



TUGAS AKHIR - RF141501

**ANALISIS DAN PEMODELAN INVERSI 3D STRUKTUR BAWAH
PERMUKAAN DAERAH PANAS BUMI SIPOHOLON
BERDASARKAN DATA GAYA BERAT**

Disusun Oleh:

**JOBIT PARAPAT
NRP. 3713100027**

Dosen Pembimbing:

**ANIK HILYAH, S.Si., M.T.
NIP. 197908132008122002**

**Dr. WIDYA UTAMA, DEA
NIP. 196110241988031001**

**DEPARTEMEN TEKNIK GEOFISIKA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



TUGAS AKHIR - RF141501

**ANALISIS DAN PEMODELAN INVERSI 3D STRUKTUR BAWAH
PERMUKAAN DAERAH PANAS BUMI SIPOHOLON
BERDASARKAN DATA GAYA BERAT**

Disusun Oleh:

**JOBIT PARAPAT
NRP. 3713100027**

Dosen Pembimbing:

**ANIK HILYAH, S.Si., M.T.
NIP. 197908132008122002**

**Dr. WIDYA UTAMA, DEA
NIP. 196110241988031001**

**DEPARTEMEN TEKNIK GEOFIKA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



UNDERGRADUATE THESIS - RF141501

**ANALYSIS AND 3D INVERSION MODELLING OF
SUBSURFACE STRUCTURAL OF SIPOHOLON GEOTHERMAL
AREA BASED ON GRAVITY DATA**

**JOBIT PARAPAT
NRP. 3713100027**

Supervisors:

**ANIK HILYAH, S.Si., M.T.
NIP. 197908132008122002**

**Dr. WIDYA UTAMA, DEA
NIP. 196110241988031001**

**GEOPHYSICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND PLANNING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

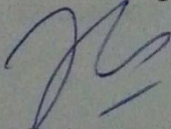
**ANALISIS DAN PEMODELAN INVERSI 3D STRUKTUR BAWAH
PERMUKAAN DAERAH PANAS BUMI SIPOHOLON BERDASARKAN
DATA GAYA BERAT**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Departemen Teknik Geofisika
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya, 26 Juli 2017

Dosen Pembimbing 1

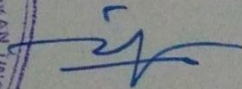


Anik Hilyah, S.Si., M.T.
NIP. 197908132008122002

Menyetujui

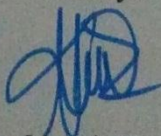


Dosen Pembimbing 2



Dr. Widya Utama, DEA
NIP. 196110241988031001

Mengetahui,
Kepala Laboratorium Petrofisika
Departemen Teknik Geofisika
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya



Wien Lestari, S.T., M.T.
NIP. 198110022012122003

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Analisis dan Pemodelan Inversi 3D Struktur Bawah Permukaan Daerah Panas Bumi Sipoholon Berdasarkan Data Gaya Berat**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 27 Juli 2017

Jobit Parapat
NRP. 3713100027

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ANALISIS DAN PEMODELAN INVERSI 3D STRUKTUR BAWAH PERMUKAAN DAERAH PANAS BUMI SIPOHOLON BERDASARKAN DATA GAYA BERAT

Nama Mahasiswa : Jobit Parapat
NRP : 3713100027
Departemen : Teknik Geofisika – FTSP ITS
Dosen Pembimbing : Anik Hilyah, S.Si., M.T.
Dr. Widya Utama, DEA

ABSTRAK

Daerah panas bumi Sipoholon merupakan salah satu daerah berpotensi panas bumi yang terletak di Kabupaten Tapanuli Utara, Propinsi Sumatera Utara, dan berada pada zona patahan Sumatera dengan manifestasi permukaan berupa mata air panas, bualan gas dan solfatar. Penelitian rinci metode gaya berat telah dilakukan di daerah ini pada tahun 2005. Sebanyak 230 data gaya berat telah diukur di daerah ini dengan cakupan luas pengukuran sekitar 14 km x 16 km. Untuk melengkapi pemodelan 2D gaya berat terdahulu, maka penulis melakukan pemodelan 3D pada data gaya berat daerah ini. Studi ini bertujuan untuk mengetahui gambaran bawah permukaan berdasarkan distribusi densitas batuan secara tiga dimensi (3D). Hasil pemodelan berupa blok berdensitas rendah maupun tinggi diinterpretasikan dan dikorelasikan dengan informasi dan data-data geologi. Hasil pemodelan inversi 3D gaya berat ini memperlihatkan bahwa adanya blok batuan berdensitas tinggi dengan nilai antara 2,80 – 3,00 g/cm³ yang berada di bagian selatan dan timur dengan kedalaman > 2 km. Blok batuan ini diinterpretasikan sebagai tubuh batuan beku intrusif dan diduga berperan sebagai sumber panas dari sistem panas bumi Sipoholon. Selain itu, model juga menunjukkan adanya blok batuan berdensitas rendah nilai antara 2,0 - 2,3 gr/cm³ dekat permukaan dan di sekitar mata air panas daerah penelitian. Blok batuan ini diinterpretasikan sebagai batuan yang berasosiasi dengan rekahan membentuk zona patahan yang mengontrol manifestasi permukaan daerah Sipoholon. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai informasi awal dalam pembuatan model konseptual sistem panas bumi daerah penelitian.

Kata kunci: Gaya berat, panas bumi, pemodelan 3D, sumber panas, zona patahan

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ANALYSIS AND 3D INVERSION MODELLING OF SUBSURFACE STRUCTURAL OF SIPOHOLON GEOTHERMAL AREA BASED ON GRAVITY DATA

Student Name : Jobit Parapat
Student ID Number : 3713100027
Department : Geophysical Engineering – ITS
Supervisors : Anik Hilyah, S.Si., M.T.
Dr. Widya Utama, DEA

ABSTRACT

Sipoholon geothermal filed is one of geothermal potential area which is located in the vicinity of Tarutung basin, North Tapanuli, North Sumatera Province and situated in the Sumatera fault system. Sipoholon area have the surface manifestations such as hot springs, travertine deposits, and solfatara. At 2005, series of gravity investigation has been done in this field. The gravity data were measured from 230 stations covering an area of about 16 km x 14 km. To complete recent 2D modeling of gravity data, the author has done 3D modeling of gravity data of this area. The purpose of the study is to know the subsurface condition based on 3D model of density distribution. The result of modeling is the blocks with high or low density which is interpreted and correlated with geological information. The result of 3D gravity inversion modeling show that there is a presence of high density blocks whose value between 2,80 – 3,00 g/cm³ which located in the southern and eastern with > 2 km of depth. These blocks is interpreted as an intrusive body and considered as the heat source of Sipoholon geothermal system. The model also show the low density blocks whose value between 2,0 - 2,3 gr/cm³ near the surface and around the hot springs. These low density blocks is considered to be associated to fractured rocks filling the fault zone that control the surface manifestation of Sioholon area. The result of this study can be used as an initial information in making conceptual model of geothermal system of this area.

Keywords: Gravity, geothermal, 3D modelling, heat source, fault zone

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kepada Tuhan Yesus Kristus karena atas berkat dan perkenanan-Nya sehingga laporan Tugas Akhir dengan judul “**Analisis dan Pemodelan Inversi 3D Struktur Bawah Permukaan Daerah Panas Bumi Sipoholon Berdasarkan Data Gaya Berat**” ini dapat terselesaikan dengan baik.

Pelaksanaan dan penyusunan Laporan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bimbingan, bantuan, dan dukungan berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapa, Uma, Opung, Abang Sam, Adek Trifosa, Adek Oinike, dan semua keluarga, yang menjadi motivasi terbesar penulis, atas dukungan dan doa yang senantiasa.
2. Ibu Anik Hilyah, S.Si., M.T. dan Bapak Dr. Widya Utama, DEA selaku dosen pembimbing yang selalu memberi motivasi dan masukan.
3. Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP) Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia atas data survei gaya berat dan geologi yang diberikan.
4. Seluruh dosen Departemen Teknik Geofisika ITS yang telah memberikan ilmu selama penulis melakukan studi di Departemen Teknik Geofisika ITS.
5. Mbak Fitri Jusmi atas kesediaannya berbagi pengalaman berharga dalam penggunaan perangkat lunak dan pengolahan data.
6. Bapak Yuano (PSDMBP), Bapak Mustika Delimantoro (KESDM RI), Bapak Fery Girsang (Geologi DISTAMBEN Sumut) dan Bapak Mekto Purba (Dinas ESDM Taput) atas informasi berharga yang diberikan.
7. Sahabat saya, Putri Sentosa Sitompul, yang memberi dukungan dan doa.
8. Teman-teman TG-02 atas dukungan dan diskusinya.
9. Semua pihak yang tidak dapat dituliskan satu per satu oleh penulis atas doa dan dukungannya selama penulis mengerjakan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa dalam Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan dan masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan untuk pengembangan di masa yang akan datang. Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak dan diterima sebagai sumbangan pemikiran dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, 27 Juli 2017

Jobit Parapat

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	2
1.3 Rumusan Masalah.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Geologi Daerah Sipoholon.....	5
2.1.1 Struktur Geologi Sipoholon.....	5
2.1.2 Stratigrafi Daerah Sipoholon.....	8
2.1.3 <i>Geothermal Play</i> Daerah Panas Bumi Sipoholon.....	11
2.1.4 Zona Depresi Tarutung.....	12
2.2 Model Konseptual Sistem Panas Bumi.....	13
2.3 Metode Gaya Berat.....	16
2.3.1 Konsep Gaya Berat.....	17
2.3.2 Anomali Bouguer.....	18
2.3.3 Densitas Batuan.....	19
2.4 Pemisahan Anomali Menggunakan Metode <i>Second Vertical</i> <i>Derivative</i>	20
2.5 Pemodelan Inversi 3D.....	21
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1 Lokasi Daerah Penelitian.....	23
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian.....	24
3.3 Data dan Peralatan.....	24
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	26
3.5 Prosedur Penelitian.....	27
3.6 Cara Pengolahan Data.....	28
3.7 Peta Jalan Penelitian.....	30
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1 Estimasi Densitas Batuan.....	33
4.2 Data Anomali Bouguer.....	34
4.3 Hasil Pemisahan Anomali.....	38
4.4 Hasil Pemodelan.....	40

4.4.1 Model Awal	40
4.4.2 Hasil Pemodelan Inversi 3D	40
4.5 Interpretasi Penampang Model 2D	44
4.6 Analisis Model 3D	52
BAB 5 PENUTUP	55
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran	55
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN	61
BIODATA	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Peta analisis citra satelit daerah Sipoholon (Tim Penyelidikan Terpadu PSDG, 2005).....	7
Gambar 2.2. Peta geologi daerah panas bumi Sipoholon (modifikasi dari PSDG, 2011).....	10
Gambar 2.3. Tipe <i>extensional domain play</i> (modifikasi dari Moeck, 2013).....	11
Gambar 2.4. Peta topografi DEM 90m daerah Sipoholon (Nukman, 2013).....	12
Gambar 2.5. Model sederhana pembentukan graben Tarutung (modifikasi dari Muksin, 2013).....	13
Gambar 2.6. Contoh model konseptual sistem panas bumi di Sorik Marapi (PSDG, 2015).....	15
Gambar 2.7. Ilustrasi model sistem panas bumi hidrotermal (modifikasi dari Niasari, 2015)	16
Gambar 2.8. Konsep gaya tarik-menarik antara dua benda (Hinze, 2013)	17
Gambar 2.9. Nilai densitas beberapa batuan (Hinze, 2013).....	19
Gambar 2.10. Ilustrasi ambiguitas penyebab anomali gaya berat (Hinze, 2013).....	20
Gambar 3.1. Lokasi daerah penelitian	23
Gambar 3.2. Diagram alir penelitian.....	26
Gambar 3.3. Parameter model awal	29
Gambar 3.4. Contoh data anomali residual format *.dat	29
Gambar 3.5. Peta jalan penelitian tugas akhir.....	31
Gambar 4.1. Peta topografi daerah Sipoholon-Tarutung dan persebaran titik pengukuran gaya berat.....	35
Gambar 4.2. Peta anomali Bouguer densitas 2,43 g/cm ³ daerah Sipoholon.....	37
Gambar 4.3. Peta anomali residual densitas 2,43 g/cm ³ daerah Sipoholon	39
Gambar 4.4. Model awal menggunakan <i>Grablox 1.6</i> dan tampilan 3D pada <i>Bloxer 1.6</i>	41
Gambar 4.5. Hasil komputasi dasar	43
Gambar 4.6. Model hasil akhir optimasi Occam h	45
Gambar 4.7. Posisi sayatan penampang vertikal 2D.....	47
Gambar 4.8. Penampang model 2D lintasan A-A'	48
Gambar 4.9. Penampang model 2D lintasan B-B'	49
Gambar 4.10. Penampang model 2D lintasan C-C'	50
Gambar 4.11. Penampang model 2D lintasan D-D'	50
Gambar 4.12. Penampang model 2D lintasan E-E'	51
Gambar 4.13. Penampang model 2D lintasan F-F'	52
Gambar 4.14. Analisis model 3D distribusi densitas	53

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Operator filter SVD menurut Elkins (Elkins, 1951)	21
Tabel 4.1. Densitas sampel batuan daerah panas bumi Sipoholon (Djudjun, 2005)	33

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Daerah Sipoholon, yang terletak di Kabupaten Tapanuli Utara, berdasarkan manifestasi permukaan panas bumi dan pola geologinya merupakan daerah yang berpotensi adanya sumber daya panas bumi. Sayangnya, sampai saat ini potensi energi tersebut belum dikembangkan untuk pembangkit tenaga listrik sebagai kegunaan utama (Situmorang, 2005). Mengacu pada Peraturan Presiden No. 5 tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional yang menargetkan penggunaan energi panas bumi untuk pemenuhan kebutuhan listrik di Indonesia sebesar 5% pada tahun 2025, maka potensi panas bumi daerah ini dapat dikembangkan menjadi salah satu solusi untuk mengatasi kekurangan energi listrik di Kabupaten Tapanuli Utara. Namun, salah satu faktor yang menjadi kendala pengembangannya saat ini adalah belum adanya model konseptual sistem panas bumi daerah ini.

Model konseptual adalah penggabungan model deskriptif maupun kualitatif yang menyatukan informasi fisik penting dari sistem panas bumi (Zarkasyi, 2015). Dengan kata lain bahwa model konseptual merupakan gambaran komponen-komponen penyusun suatu sistem panas bumi yang dihasilkan dari gabungan beberapa disiplin ilmu (contoh pada Gambar 2.6). Hal ini menjadi dasar penting dari rencana pengembangan suatu lapangan panas bumi, salah satunya dalam memilih lokasi dan target dari sumur yang akan dibor (Mortensen dan Axelsson, 2013). Dalam hal ini, daerah panas bumi Sipoholon sudah pernah diteliti dari segi geologi, geokimia, dan geofisika. Hasil survei geologinya adalah manifestasi permukaan di daerah ini tersebar di 18 titik mata air panas dan 5 titik endapan *travertine*, sehingga identifikasi sementara menunjukkan bahwa sistem panas bumi daerah Sipoholon ini termasuk ke dalam jenis sistem non-vulkanik (Niasari, 2015).

Area panas bumi Sipoholon ini berada diantara beberapa gunung api non-aktif seperti Gunung Imun, Gunung Jorbing, Gunung Martimbang, Gunung Siborboron, dan Gunung Palangka Gading. Hasan, dkk (2005) mengemukakan bahwa gunung Martimbang merupakan sumber panas daerah panas bumi Sipoholon ini. Namun, data-data geofisika dan geokimia yang sudah ada tidak sepenuhnya mendukung hipotesis ini (Situmorang, 2005; Nukman dan Moeck, 2013; Muksin dkk, 2013) karena tidak menemukan indikasi apapun tentang sumber panas dibawah gunung non-aktif Martimbang (Niasari, 2015). Hal ini menyebabkan cara kerja dan sumber panas dari sistem panas bumi ini masih dalam perdebatan sampai sekarang. Oleh karena itu, perlu adanya studi geofisika dan geokimia lebih lanjut untuk mengetahui dan memastikan jenis sumber panas dari sistem panas bumi di daerah ini.

Salah satu metode geofisika yang digunakan dalam penyelidikan panas bumi yaitu metode gaya berat. Metode ini mampu memberikan gambaran bawah permukaan bumi berdasarkan variasi nilai densitas batuan penyusunnya (Setianingsih, 2013). Penggunaan metode ini dalam eksplorasi panasbumi cukup efektif karena dapat mendelineasi struktur bawah permukaan (Atef, 2016) berupa zona patahan yang ditandai dengan kontras densitas rendah dengan batuan sekitarnya (Sugianto, 2015). Dalam sistem panas bumi zona ini sangat berperan penting dalam mengontrol pemunculan manifestasi panas bumi di permukaan. Selain itu, metode gaya berat juga mampu untuk memperlihatkan persebaran daerah terpanas yang bisa diindikasikan sebagai sumber panas (Sugianto, 2015), yang ditandai dengan kontras densitas tinggi. Variasi persebaran densitas dan anomali ini didapatkan dari hasil pemodelan geofisika terhadap data pengukuran gaya berat.

Pemodelan geofisika bersifat tidak unik sehingga dapat menghasilkan beberapa model (Grandis, 2009). Pemodelan gaya berat terdahulu yang pernah dilakukan di daerah ini (lihat Lampiran 1) masih menggunakan teknik pemodelan kedepan dua dimensi (Djujun, 2005) sehingga belum sepenuhnya menggambarkan kondisi bawah permukaannya. Oleh karena itu, untuk melengkapi informasi tersebut, perlu adanya pemodelan inversi secara tiga dimensi (3D inversion modeling) terhadap data gaya berat yang sama sehingga dihasilkan struktur bawah permukaan yang lebih baik, khususnya zona patahan dan indikasi sumber panas. Hal ini karena pemodelan inversi 3D akan menghasilkan model densitas dengan visualisasi (Zarkasyi, 2015) dan resolusi kedalaman (Fedi dan Rapolla, 1999) yang lebih baik daripada model 2D.

Pemodelan inversi adalah salah satu teknik pemodelan yang parameter modelnya diperoleh langsung dari data pengamatan (Zarkasyi, 2013). Pemodelan inversi secara 3D ini dilakukan terhadap data anomali residual menggunakan perangkat lunak *Grablox* dari Pirttijarvi (2004) yang menggabungkan 2 (dua) metode inversi yaitu *Singular Value Decomposition* dan inversi Occam (Hjelt, 1992). Hasil pemodelan berupa distribusi nilai densitas ditampilkan menggunakan perangkat lunak *Bloxer* sehingga menghasilkan sayatan penampang 2D dan model 3D. Dari model densitas yang dihasilkan dapat diidentifikasi anomali tinggi sebagai indikasi adanya sumber panas dan anomali rendah sebagai zona patahan. Kemudian model penampang densitas tersebut dianalisis berdasarkan informasi geologi dan hasil penelitian geofisika sebelumnya untuk menghasilkan interpretasi model bawah permukaan yang lebih akurat.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian Tugas Akhir ini adalah:

1. Menganalisis struktur bawah permukaan berdasarkan distribusi nilai densitas hasil pemodelan inversi 3D data gaya berat daerah penelitian.

2. Melakukan identifikasi sumber panas dan zona patahan dari hasil pemodelan inversi 3D data gaya berat daerah penelitian.

1.3 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana struktur bawah permukaan berdasarkan distribusi nilai densitas hasil pemodelan inversi 3D data gaya berat daerah penelitian.
2. Bagaimana hasil identifikasi sumber panas dan zona patahan dari hasil pemodelan inversi 3D data gaya berat daerah penelitian.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian Tugas Akhir ini adalah:

1. Data gaya berat yang digunakan sebanyak 230 stasiun pengukuran yang didapatkan dari 7 lintasan dan beberapa stasiun regional.
2. Wilayah penelitian adalah daerah Sipoholon bagian tenggara dan Tarutung bagian utara dengan ukuran 14 km x 16 km.
3. Struktur bawah permukaan yang dianalisis adalah zona patahan dan indikasi sumber panas pada kondisi tahun 2005.
4. Iterasi pada proses inversi dilakukan sebanyak 40 kali.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian Tugas Akhir ini diharapkan:

1. Menjadi bahan pertimbangan dalam memilih metode survei geofisika selanjutnya
2. Menjadi salah satu acuan dalam pembuatan model konseptual sistem panas bumi daerah Sipoholon

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geologi Daerah Sipoholon

Secara regional, proses tektonik di daerah Sipoholon dipengaruhi oleh kegiatan tektonik pergerakan lempeng-lempeng utama yaitu Eurasia di utara dan Hindia Australia di bagian selatan yang saling bertumbukan sehingga mengalami penunjaman. Penunjaman yang terjadi ini mengakibatkan terbentuknya jalur pegunungan yang dikenal dengan sebutan Bukit Barisan. Hal ini terlihat pada deretan gunung api berumur Paleogen sampai Resen yang membentang dari ujung utara Sumatera sampai Teluk Semangko di bagian selatan. Deretan gunung yang ada sangat mempengaruhi litologi batuan di pulau Sumatera ini. Aktivitas vulkanisme di pulau Sumatera yang berlangsung sejak zaman Tersier sampai saat ini telah menghasilkan persebaran batuan vulkanik yang cukup luas. Batuan vulkanik di Sumatera umumnya merupakan produk gunung api strato yang muncul di atas batuan sedimen Tersier maupun Pratersier dan batuan malihan. Khusus untuk daerah Sipoholon, litologi batuan di daerah ini dapat dilihat pada Gambar 2.2.

Penunjaman di pulau Sumatera ini terbentuk secara berkala dan telah dilepaskan melalui sesar-sesar geser (transform) yang terpusat dan membentang sepanjang pulau Sumatera yang dikenal dengan Sistem Sesar Sumatera (Tim Penyelidikan Terpadu PSDG, 2005). Sistem Sesar Sumatera (SFS) ini berperan sebagai struktur utama dengan arah barat laut-tenggara yang memiliki panjang sekitar 1650 km (Katili dan Hehuwat, 1967). Umur sesar ini berbeda-beda mulai dari Kapur sampai Paleogen. Pola-pola struktur yang berkembang di pulau Sumatera mengikuti pola struktur utama ini. Sistem sesar ini tersusun oleh paling tidak 18 segmen sesar (Tjia, 1970) dan masih aktif. Sebagai akibat pergerakan aktif ini, di sepanjang jalur sesar ini terdapat banyak struktur depresi (graben) terutama di daerah pertemuan antar segmen sesar, sebagai akibat komponen gaya tarikan (extention) yang dikenal juga dengan istilah *pull-apart basin*. Keterdapatn sumber daya panas bumi di Pulau Sumatera ini, termasuk daerah Sipoholon, dipengaruhi dan dikontrol oleh struktur geologi yang berkembang di pulau ini.

2.1.1 Struktur Geologi Sipoholon

Berdasarkan analisis citra satelit (Gambar 2.1) dan pengamatan di lapangan yang dilakukan oleh Hasan, dkk (2005), di daerah penelitian ini terdapat 12 sesar kecil. Sesar-sesar ini secara umum mempunyai 4 (empat) arah orientasi yaitu barat laut - tenggara, timur laut – barat daya, utara - selatan dan barat - timur. Sesar-sesar tersebut adalah:

1. Sesar Sipoholon

Sesar ini berarah barat laut – tenggara dengan indikasi permukaan yang dicirikan oleh adanya kelurusan mata air panas (Sipoholon dan Hutabarat). Selain itu, pada citra satelit terlihat juga adanya kelurusan lembah atau tekuk lereng. Sesar ini berupa sesar normal dengan bidang naik (foot wall) berada di sebelah timur laut dan bidang turun (hanging wall) di sebelah barat daya. Sesar ini terjadi akibat adanya gaya tarikan (extension) yang berarah timur laut – barat daya.

2. Sesar Sibatu-batu

Sesar ini mempunyai arah barat laut - tenggara dan diperkirakan merupakan kemenerusan dari sesar Sipoholon ke arah tenggara daerah penelitian. Indikasi di permukaan adalah adanya mata air panas Sitompul. Selain itu dari citra satelit menunjukkan adanya kelurusan lembah. Sesar ini berupa sesar normal dengan bidang naik di sebelah timur laut dan bidang turun di sebelah barat daya.

3. Sesar Sigeaon

Sesar ini berarah barat laut – tenggara dengan indikasi di permukaan dicirikan oleh adanya bualan gas H_2S di daerah Pintubosi dan kelurusan lembah. Sesar ini berjenis sesar normal dengan bidang naik di sebelah barat daya dan bidang turun di sebelah timur laut.

4. Sesar Toru

Sesar ini berarah barat laut – tenggara. Pemunculannya dicirikan oleh adanya mata air panas dan bualan gas CO_2 (air soda), sedangkan dari kenampakan citra satelit menunjukkan adanya kelurusan tekuk lereng. Sesar ini berjenis sesar normal dengan bidang naik di sebelah timur laut dan bidang turun di sebelah barat daya.

5. Sesar Pintubosi

Sesar ini berarah timur laut - barat daya dan terletak di sebelah utara daerah penelitian. Indikasi di permukaan dicirikan oleh adanya mata air panas Tapan Nauli dan bualan gas H_2S di daerah Pintubosi serta adanya singkapan batuan ubahan, sedangkan dari kenampakan citra satelit terlihat sebagai kelurusan lembah sungai. Sesar ini berjenis sesar normal dengan bidang naik di sebelah barat laut dan bidang turun di sebelah tenggara.

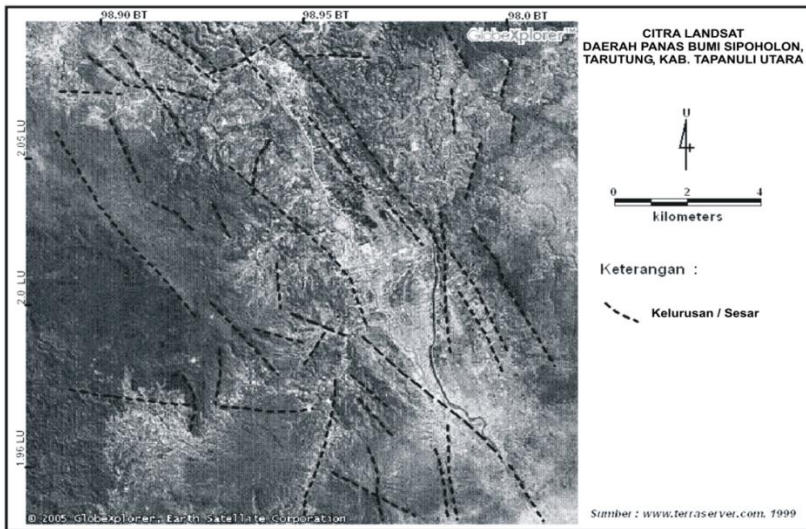
6. Sesar Tarutung

Sesar ini berarah relatif utara-selatan dan terletak di sebelah selatan daerah penelitian. Indikasinya di permukaan dicirikan oleh adanya mata air panas Ugan, sedangkan dari kenampakan citra satelit sesar ini terlihat sebagai kelurusan lembah. Sesar ini berjenis sesar normal dengan bidang naik di sebelah barat dan bagian turun di sebelah timur.

7. Sesar Parbubu

Sesar ini berarah relatif barat - timur dan terletak di wilayah barat daerah penelitian. Indikasi di permukaan dicirikan oleh adanya mata air panas Sibadak

dan Parbubu. Analisis citra satelit memperlihatkan sesar sebagai kelurusan lembah dan punggung. Sesar ini berjenis sesar normal dengan bidang naik di sebelah utara dan bidang turun di sebelah selatan.



Gambar 2.1. Peta analisis citra satelit daerah Sipoholon (Tim Penyelidikan Terpadu PSDG, 2005)

8. Sesar Siborboron

Sesar ini berarah barat laut - tenggara dan terletak di sebelah barat daerah penelitian. Dari kenampakan citra satelit, indikasi sesar ini terlihat berupa kelurusan punggung. Sesar ini berjenis sesar normal dengan bidang naik di sebelah barat daya dan bidang turun di sebelah timur laut.

9. Sesar Hutabarat

Sesar ini berarah timur laut - barat daya dengan indikasi permukaan yang dicirikan oleh adanya mata air panas dan bualan gas H_2S (Hutabarat), sedangkan pada kenampakan citra satelit terlihat sebagai kelurusan lembah sungai. Sesar ini berjenis sesar normal dengan bidang naik di sebelah barat laut dan bidang turun di sebelah tenggara.

10. Sesar Martimbang

Sesar ini berarah relatif utara - selatan dan terletak di sebelah selatan daerah penelitian. Indikasi di permukaan dicirikan oleh adanya mata air panas Parbubu, sedangkan pada kenampakan citra satelit sesar ini terlihat sebagai kelurusan lembah. Sesar ini berjenis sesar normal dengan bagian naik di sebelah barat dan bagian turun di sebelah timur.

11. Sesar Sibadak

Sesar ini berarah relatif utara - selatan. Indikasi sesar ini hanya berupa kelurusan lembah sungai dan kemungkinan merupakan sesar penyerta dari Sistem Sesar Sumatera (SFS). Sesar ini berjenis sesar normal dengan bidang naik di sebelah timur dan bidang turun di sebelah barat.

12. Sesar Jorbing

Sesar ini berarah barat laut - tenggara dan terletak di sebelah tenggara daerah penelitian. Indikasi di permukaan dicirikan oleh kelurusan punggung dan lereng. Sesar ini berjenis sesar normal dengan bidang naik di sebelah timur laut dan bidang turun di sebelah barat daya.

Semua sesar diatas merupakan faktor yang sangat berperan dalam terbentuknya manifestasi panas bumi di daerah penelitian. Manifestasi panas bumi di daerah penelitian terdiri atas mata air panas, bualan gas, dan solfatar. Beberapa manifestasi mata air panas yang terdapat pada daerah penelitian yaitu mata air panas Sipoholon, Hutabarat, Sitompul, Tapian Nauli, Sipolhas, Parbubu-2, Ugan, Penabungan, Pansur Batu, Simamora, dan Sait Nihuta (Hasan, 2005).

2.1.2 Stratigrafi Daerah Sipoholon

Pengamatan dan pengambilan sampel terhadap batuan penyusun daerah penelitian telah dilakukan oleh Tim Penyelidikan Terpadu PSDG (2005) di 54 lokasi titik amat. Berdasarkan hasil pemetaan di lapangan dan pengamatan makroskopis yang dilakukan oleh Hasan, dkk (2005), litologi di daerah penelitian dapat dibagi menjadi 8 (delapan) satuan batuan yang terdiri dari 6 (enam) satuan batuan vulkanik, 1 (satu) satuan batuan sedimen, dan 1 (satu) satuan batuan endapan permukaan (lihat Gambar 2.2). Menurut Hasan, dkk (2005), urutan genesa batuan tersebut dari tua ke muda adalah sebagai berikut.

1. Satuan Lava Jorbing (Tmlj)

Satuan ini menyebar di bagian tenggara daerah penelitian. Merupakan penyusun satuan morfologi relief sedang-terjal yang tersusun oleh batuan beku andesit berwarna abu-abu terang gelap, porfiritik, sebagian telah mengalami pelapukan dan ubahan yang lemah. Dari hasil pengamatan mikroskopis, batuan ini adalah andesit piroksen yang diperkirakan berumur Tersier (Miosen) dan berasal dari erupsi Gunung Jorbing. Batuan ini kontak tak selaras dengan satuan di atasnya yaitu piroklastik Toba.

2. Satuan Lava Siborboron (Tmlsb)

Satuan ini menyebar di bagian barat daerah penelitian dengan menempati satuan morfologi relief terjal di lereng Gunung Siborboron. Terdiri dari batuan beku dengan warna abu-abu muda-tua dengan komposisi andesitik. Dari hasil analisis sayatan tipis, satuan ini didominasi oleh batuan beku andesit piroksen yang diperkirakan berumur Miosen dan berasal dari

erupsi Gunung Siborboron, dengan posisi stratigrafinya yang berada tidak selaras di bawah satuan Piroklastik Toba.

3. Satuan Piroklastik Toba 1 (Qvt 1)

Satuan ini menyebar di bagian selatan daerah penelitian tepatnya di sebelah barat Gunung Martimbang. Di beberapa tempat terdapat sisa aktivitas hidrotermal berupa endapan oksida besi. Dari hasil pengamatan sayatan tipis, satuan ini termasuk dalam tufa gelas yang diperkirakan berumur Kuartar dan merupakan aliran piroklastik hasil aktivitas gunung api purba Toba.

4. Satuan Piroklastik Toba 2 (Qvt 2)

Satuan ini menyebar hampir di semua bagian daerah penelitian dengan ciri-ciri berwarna abu-abu terang, mengandung fragmen batu apung dengan diameter mencapai 10 cm, dan berkomposisi riadasit. Diperkirakan bahwa satuan ini berumur Kuartar dan merupakan aliran piroklastik hasil aktivitas gunung api purba Toba.

5. Satuan Lava Palangka Gading (Qvpg)

Satuan ini menyebar di bagian barat daerah penelitian yang terdiri dari batuan beku andesitik dengan ciri-ciri berwarna abu-abu kehijauan. Dari hasil pengamatan sayatan tipis, satuan ini tersusun oleh batuan Andesit Piroksen, dengan kedudukan selaras di atas satuan piroklastik Toba 2. Satuan ini diperkirakan berumur Kuartar dan berasal dari erupsi Gunung Palangka Gading.

6. Satuan Kubah Lava Martimbang (Qvma)

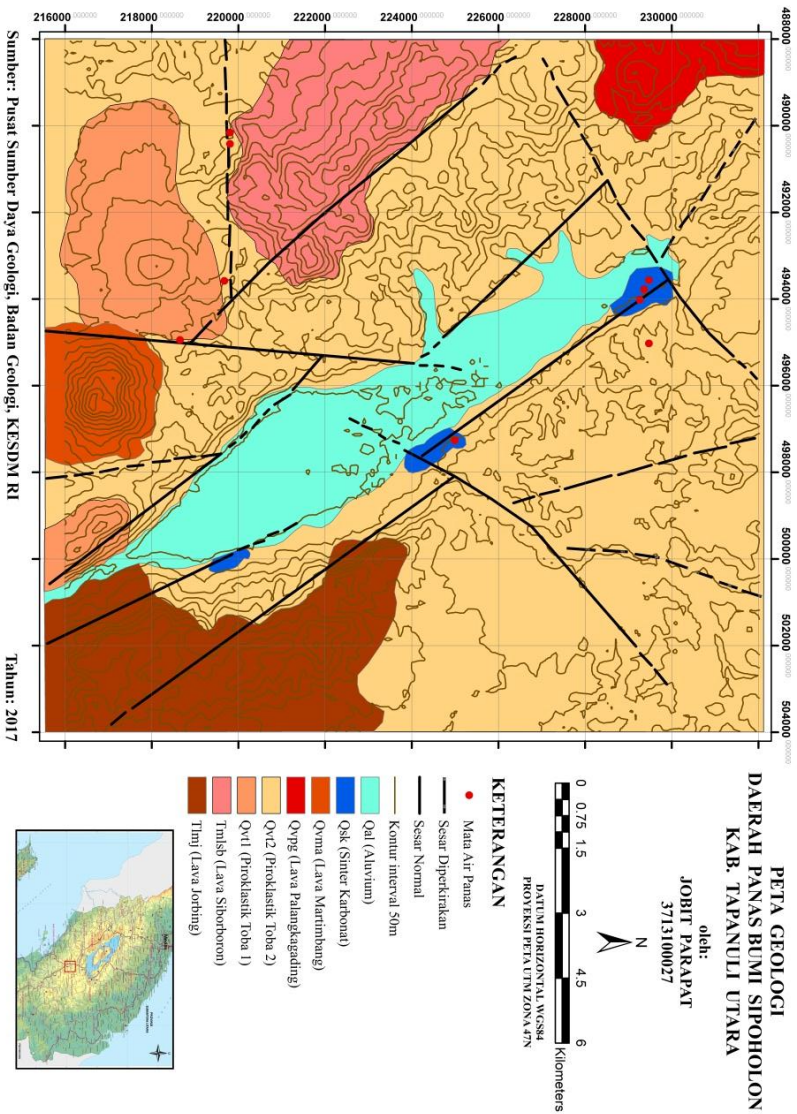
Satuan ini tersebar di daerah selatan daerah penelitian yaitu di sekitar lereng Gunung Martimbang. Terdiri dari batuan beku andesitik, hasil pembekuan lava Gunung Martimbang. Dari hasil sayatan tipis, satuan ini termasuk dalam andesit piroksen. Berdasarkan metode *Fission Track*, satuan ini diperkirakan berumur 600.000 tahun atau Kuartar.

7. Satuan Sinter Karbonat (Qsk)

Satuan yang terdapat di sekitar manifestasi panas bumi ini merupakan hasil endapan fluida panas bumi yang berkomposisi bikarbonat dan di beberapa tempat terdapat struktur perlapisan dan gua (caving) dengan stalaktit dan stalagmit. Dari hasil pengamatan sayatan tipis menunjukkan bahwa 95% satuan ini terdiri dari kristal kalsit hasil rekristalisasi fluida berkomposisi bikarbonat. Satuan ini merupakan batuan sedimen dan proses pembentukannya masih berlangsung hingga saat ini.

8. Satuan Endapan Alluvial (Qal)

Satuan ini merupakan endapan permukaan yang terkonsentrasi di daerah graben Tarutung yaitu di sepanjang lereng Sungai Sigaeon. Satuan ini terdiri dari pasir, tuf, dan batuan beku andesit, yang memiliki fragmen dengan ukuran diameter mencapai 50 cm, membundar-bundar tanggung, dan tidak padu.

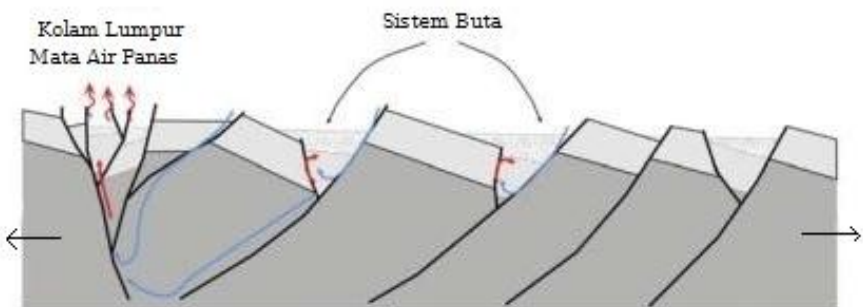


Gambar 2.2. Peta geologi daerah panas bumi Sipoholon (modifikasi dari PSDG, 2011)

2.1.3 *Geothermal Play* Daerah Panas Bumi Sipoholon

Dalam eksplorasi panas bumi, hal yang pertama sekali harus dilakukan adalah memahami kondisi geologi daerah yang akan diteliti. Langkah awal dalam studi geologi ini adalah menentukan pola geologi (*geological setting*) termasuk struktur geologinya, sehingga bisa ditentukan bahwa suatu daerah yang sedang diteliti termasuk dalam tipe *geothermal play* yang mana. *Geothermal play* bisa diartikan sebagai sesuatu yang menuntun kita pada model geodinamika, geologi, dan panas yang berhubungan dengan sumber panas, perpindahan panas, dan jalur migrasi (Moeck, 2013). Dari jenis *geothermal play* inilah bisa diketahui kondisi geologi yang mengindikasikan bahwa ada sumber daya panas bumi yang bisa ditemukan (International Geothermal Association, 2014) dan termasuk jenisnya, sistem vulkanik atau non-vulkanik (Hochstein dan Sudarman, 1993). Dengan mengetahui *geothermal play* suatu daerah yang akan kita teliti, maka akan menuntun kita pada pertimbangan metode eksplorasi dan desain akuisisi yang cocok untuk dipakai.

Dari beberapa tipe *geothermal play* yang diberikan oleh Moeck (2013), maka daerah Sipoholon lebih mendekati termasuk ke dalam tipe *extensional domain play*. Tipe ini termasuk ke dalam sistem dominasi konveksi yaitu adanya aliran siklus air permukaan pada kondisi dangkal maupun dalam akibat adanya sumber panas di bawah permukaan bumi. Tipe ini terbentuk akibat terjadinya peregangan dan penipisan kerak bumi, sehingga mantel mengalami pengangkatan yang menyebabkan gradien panas di daerah tersebut lebih tinggi dari biasanya. Peregangan terjadi karena adanya gaya yang saling tarik-menarik pada arah yang berlawanan (Gambar 2.3). Sistem ini juga lebih dominan dipengaruhi oleh struktur patahan. Akibat arah yang berlawanan, maka patahan-patahan tersebut biasanya relatif saling turun terhadap yang lain sehingga terbentuk bagian yang lebih rendah. Tipe ini biasanya ditandai dengan adanya batuan yang kompleks, peregangan *back-arc*, cekungan atau graben (*pull-apart basin*), dan *intracontinental rift* (International Geothermal Association, 2014).

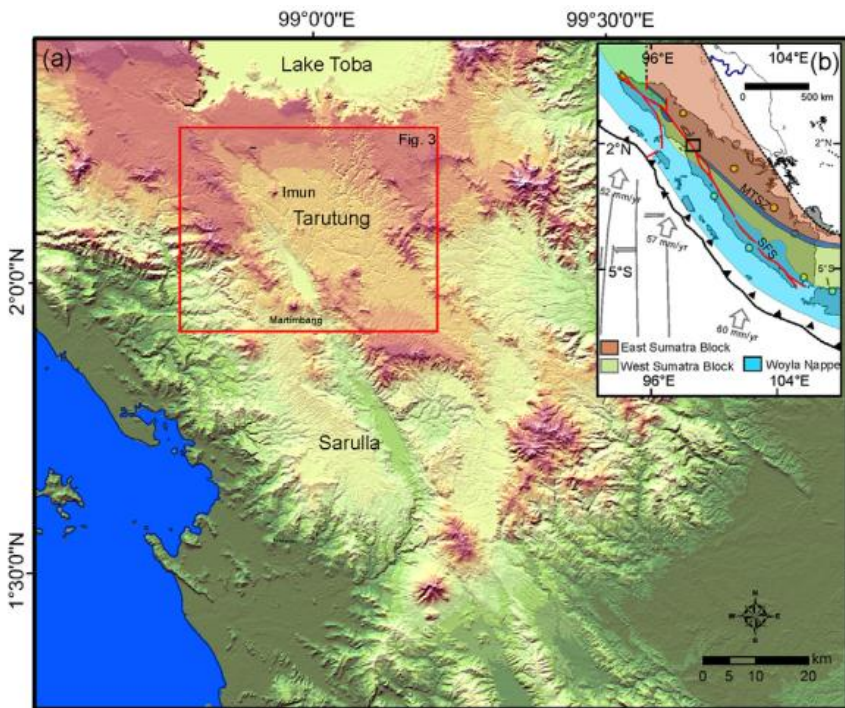


Gambar 2.3. Tipe *extensional domain play* (modifikasi dari Moeck, 2013)

Beberapa graben yang terbentuk di Pulau Sumatera termasuk ke dalam tipe ini, termasuk graben Tarutung, yang menjadi bagian dari daerah penelitian. Hal ini disebabkan karena pergerakan sesar geser pada Sistem Sesar Sumatera bergerak secara aktif.

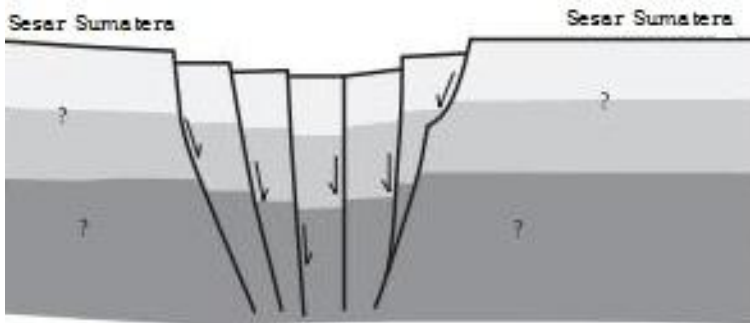
2.1.4 Zona Depresi Tarutung

Salah satu zona depresi yang terbentuk di pulau Sumatera yaitu graben Tarutung (berada pada kotak merah gambar 2.4). Graben Tarutung terletak di sebelah selatan kaldera Toba dengan potensi sumber daya panas bumi. Graben Tarutung adalah cekungan (pull-apart basin) yang terbentuk karena pelepasan patahan Sumatera akibat adanya gaya tarikan ke barat dan timur yang saling berlawanan. Interpretasi dari data SRTM (Gambar 2.4) menunjukkan bahwa cekungan ini memiliki geometri yang panjang namun sempit. Graben ini termasuk dalam segmen patahan yang saling menjauh (divergen). Menurut Nukman dan Moeck (2013), graben Tarutung ini merupakan daerah yang dibentuk oleh beberapa patahan normal (turun) yang cukup kompleks (ilustrasi pada Gambar 2.5).



Gambar 2.4. Peta topografi DEM 90m daerah Sipoholon (Nukman, 2013)

Menurut Muksin (2013), dugaan proses pembentukan graben Tarutung ini dapat diilustrasikan dengan model seperti pada Gambar 2.5 di bawah. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa graben dibentuk oleh beberapa sesar yang relatif saling turun terhadap yang lain. Proses pergerakan dan gesekan antar sisi yang ada tentunya mengurangi kekompakan batuan sehingga akan lebih mudah diterobos oleh magma ataupun batuan intrusi. Rongga yang ada akan menjadi jalan keluarnya panas yang tersimpan ke permukaan. Panas yang terbentuk ini bisa berpotensi menjadi sumber daya panas bumi, salah satunya adalah daerah panas bumi Sipoholon, tentunya apabila didukung dengan adanya komponen-komponen sistem panas bumi yang lain. Komponen-komponen ini dapat digambarkan secara jelas pada model konseptual sistem panas bumi.



Gambar 2.5. Model sederhana pembentukan graben Tarutung (modifikasi dari Muksin, 2013)

2.2 Model Konseptual Sistem Panas Bumi

Model konseptual adalah penggabungan model deskriptif maupun kualitatif yang menyatukan informasi fisik penting dari sistem panas bumi (Zarkasyi, 2015). Hal ini menjadikan model konseptual lebih informatif daripada setiap disiplin ilmu yang mengembangkan model sendiri. Menurut Cumming (2009), model konseptual merupakan informasi yang terbaik dalam menggambarkan kondisi geologi, geokimia, dan properti fisik batuan dari suatu sistem panas bumi. Hal ini menjadi dasar penting dari rencana pengembangan suatu lapangan panas bumi, salah satunya dalam memilih lokasi dan target dari sumur yang akan dibor (Mortensen dan Axelsson, 2013). Setelah tahapan eksplorasi, model bawah permukaan dapat dibentuk menjadi model 3D yang lebih kompleks termasuk data 3D geofisika dan distribusi temperatur 3D (Akar, dkk., 2011). Model konseptual ini dapat dibangun menggunakan informasi yang ada terlebih dahulu, kemudian diperbarui dengan data tambahan pada setiap tahapnya (Boseley, et al., 2010) untuk menambah informasi mengenai sistem panas bumi dan struktur yang mengontrolnya secara lebih tepat. Dengan kata lain bahwa model konseptual merupakan gambaran komponen-komponen

penyusun suatu sistem panas bumi dan struktur yang mengontrolnya yang dihasilkan dari integrasi beberapa disiplin ilmu.

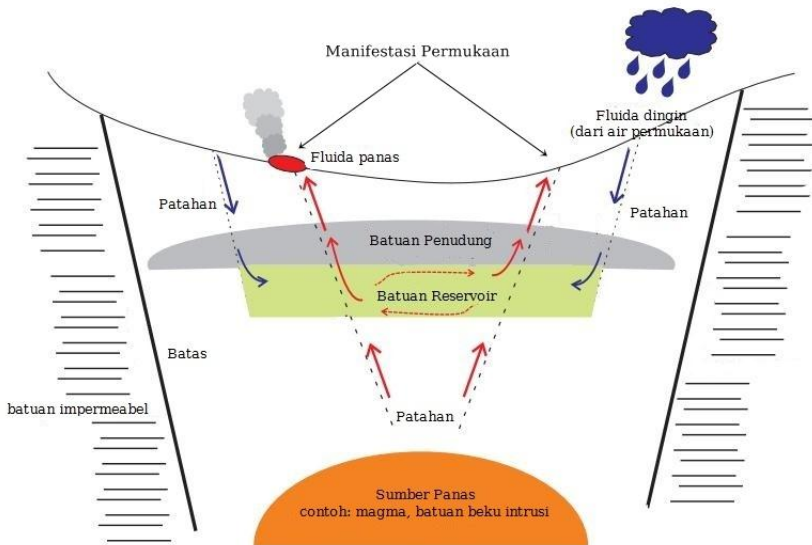
Sistem panas bumi didefinisikan sebagai perpindahan panas secara alami dalam volum tertentu di kerak bumi dimana panas dipindahkan dari sumber panas ke zona pelepasan panas (Hochstein dan Browne, 2000) sehingga membentuk manifestasi di permukaan bumi. Sedangkan William, dkk (2011) mengungkapkan bahwa sistem panas bumi adalah zona dimana porsi energi panas dari bumi bisa diekstrak dan ditransportasikan ke posisi tertentu termasuk ke permukaan bumi untuk digunakan. Sistem panas bumi dapat diklasifikasikan berdasarkan geologi, hidrologi, dan karakteristik transfer panasnya, salah satunya adalah sistem hidrotermal (Sukhyar, dkk., 2012). Sistem panas bumi hidrotermal secara umum terdiri dari sumber panas, batuan *permeable* sebagai reservoir, batuan *impermeable* sebagai batuan tudung, area peresapan fluida (recharge area), manifestasi permukaan (discharge area), dan zona patahan yang menjadi jalur migrasi (Gambar 2.7). Menurut Sukhyar, dkk. (2012), panas dapat berpindah secara konduktif dan konvektif. Perpindahan panas secara konduktif adalah perpindahan panas melalui bahan akibat adanya interaksi molekul penyusun batuan dalam mantel. Perpindahan panas secara konvektif adalah perpindahan panas yang diikuti oleh perpindahan massa.

Proses konveksi membuat fluida bergerak karena perbedaan densitas antara air resapan dan fluida panas bumi, dimana air resapan yang suhunya lebih rendah bergerak ke bawah sedangkan fluida panas bumi yang suhunya lebih tinggi muncul ke permukaan bumi oleh gaya pengapungan melalui jalur zona patahan. Dalam penelitian ini, yang menjadi target studi adalah batuan sumber panas dan zona patahan yang menjadi pengontrol manifestasi permukaan.

Berdasarkan sumber panas, sistem panas bumi dapat dibedakan menjadi sistem vulkanik dan non-vulkanik (Hochstein dan Sudarman, 1993). Pada sistem panas bumi vulkanik, secara khusus di Indonesia, sumber panas berasal dari intrusi panas magma dangkal yang biasanya berasosiasi dengan gunung api yang berstatus aktif maupun tidak. Biasanya jenis manifestasi permukaan tipe ini antara lain fumarol bersuhu tinggi, lubang di sekitar gunung api dimana uap panas keluar, alterasi permukaan asam, dan lain-lain (Hochstein dan Browne, 2000). Sumber panas untuk jenis non-vulkanik antara lain gradien panas pada batuan sedimen, sirkulasi air dalam, ataupun intrusi batuan beku tua (International Geothermal Association, 2014). Rata-rata normal gradien panas sekitar $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (Fridleifson, dkk., 2008). Apabila kita mengasumsikan bahwa rata-rata suhu permukaan adalah 15°C , maka suhu pada kedalaman normal 3 km adalah 105°C . Berbeda apabila terdapat batuan intrusi, maka suhu di kedalaman yang sama akan jauh lebih besar akibat sisa panas yang masih tersimpan dalam batuan tersebut. Jika ditinjau dari nilai densitasnya, maka batuan yang menjadi sumber panas dalam suatu sistem panas bumi cenderung

memiliki nilai kontras densitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan batuan di sekitarnya (Sugianto, 2015).

Dalam sistem panas bumi, zona patahan berperan sebagai jalur migrasi fluida sehingga terbentuk manifestasi permukaan. Patahan ini terbentuk akibat pergerakan tektonik yang masih aktif, bisa berupa patahan normal, patahan naik maupun patahan geser. Proses pembentukan patahan ini menyebabkan batuan mengalami pengurangan kekompakan. Hal ini akan membuat batuan memiliki porositas dan permeabilitas yang jauh lebih besar dibandingkan sebelumnya, sehingga berpotensi sebagai jalur aliran fluida. Jika ditinjau dari nilai densitasnya, maka batuan yang terdapat pada zona patahan cenderung memiliki nilai kontras densitas yang lebih rendah dibandingkan dengan batuan disekitarnya (Sugianto, 2015). Kedua komponen sistem panas bumi ini dapat diidentifikasi dengan baik menggunakan metode gaya berat (gravitasi).



Gambar 2.7. Ilustrasi model sistem panas bumi hidrotermal (modifikasi dari Niasari, 2015)

2.3 Metode Gaya Berat

Metode gaya berat adalah metode eksplorasi geofisika berupa pengukuran medan gravitasi yang disebabkan oleh variasi densitas secara vertikal di bawah permukaan bumi (Hinze, 2013). Metode ini merupakan salah satu hal penting dalam banyak masalah yang melibatkan pemetaan bawah permukaan bumi dan studi geologi. Metode gaya berat ini didasarkan atas sifat massa dari benda-benda di alam, dimana besarnya massa tersebut sangat menentukan besarnya gaya tarik-menarik diantara benda tersebut (Djujun,

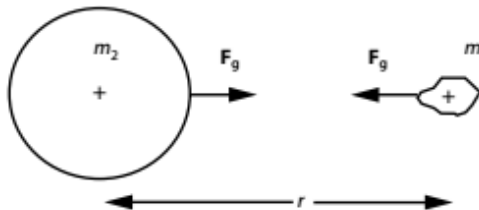
2005). Metode ini dapat digunakan di daerah prospek panas bumi karena sistem panas bumi tersusun dari komponen-komponen batuan yang masing-masing mempunyai kontras densitas berbeda dengan sekitarnya.

2.3.1 Konsep Gaya Berat

Teori paling mendasar dalam metode gaya berat adalah Hukum Newton tentang gaya tarik-menarik antara benda dengan massa tertentu seperti pada Gambar 2.8. Sesuai dengan Hukum I Newton, bahwa kedua benda tersebut akan saling tarik-menarik karena adanya fenomena gravitasi yang disebut medan gaya gravitasi yang besarnya dapat dinyatakan dengan persamaan (Hinze, 2013):

$$\mathbf{F}_g = \mathbf{G} \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (2.1)$$

dimana F_g adalah gaya tarik-menarik (N), G adalah konstanta Gravitasi Universal ($6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$), m_1 dan m_2 adalah massa benda (kg), serta r adalah jarak antar pusat kedua buah benda (m).



Gambar 2.8. Konsep gaya tarik-menarik antara dua benda (Hinze, 2013)

Medan gravitasi bumi tidak dapat diukur secara independen dari suatu massa. Percepatan gravitasi dari sebuah massa yang jatuh sebagai respon medan gravitasi digunakan untuk menggambarkan gaya gravitasi (Hinze, 2013). Oleh karena itu, Hukum II Newton dapat dikorelasikan dengan Hukum I Newton, sehingga dari persamaan (2.1) dapat dihasilkan persamaan (Hinze, 2013):

$$\mathbf{F}_g = \mathbf{m}_1 \mathbf{a} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{G} \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} = \mathbf{m}_1 \mathbf{a} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{G} \frac{m_2}{r^2} = \mathbf{a} \quad (2.4)$$

dimana a adalah percepatan (m/s^2) yang kemudian disebut sebagai percepatan gravitasi. Percepatan gravitasi \mathbf{a} adalah besaran yang diukur dalam eksplorasi geofisika yang secara umum disimbolkan dengan \mathbf{g} sehingga persamaan (2.4) dapat ditulis menjadi persamaan:

$$\mathbf{g} = \mathbf{G} \frac{m_2}{r^2} \quad (2.5)$$

Dapat dilihat bahwa besarnya percepatan gravitasi \mathbf{g} berbanding lurus dengan massa \mathbf{m} , yaitu perkalian antara massa jenis (densitas) ρ dengan volum

benda, sehingga besarnya g yang terukur merupakan pencerminan dari densitas dan volume massa penyebabnya. Gaya gravitasi selalu positif karena semua objek yang terlibat saling tarik-menarik antara satu sama lain, tetapi variasi gravitasi bisa saja negatif dalam eksplorasi geofisika sebagai akibat hasil dari massa yang lebih rendah dari massa normal sesuai dengan variasi densitas vertikal di dalam bumi (Hinze, 2013).

Menurut Telford, dkk. (1976) dalam kenyataannya bentuk bumi tidaklah bulat tetapi berbentuk elipsoid, sehingga besarnya percepatan gravitasi g yang terukur di setiap permukaannya berbeda-beda. Variasi gaya berat tersebut dipengaruhi oleh 5 (lima) faktor yaitu posisi lintang, ketinggian, topografi, pasang surut, dan variasi densitas batuan di bawah permukaannya. Oleh karena itu, hasil pengukuran metode gaya berat di lapangan harus dikoreksi terlebih dahulu untuk mereduksi gangguan (dikenal dengan sebutan *noise*) yang ditimbulkan. Hasil pengukuran terkoreksi ini akan menghasilkan anomali percepatan gaya berat yang disebut dengan anomali Bouguer (Blakely, 1996), yang siap diolah dan diinterpretasi lebih lanjut untuk mendapatkan informasi bawah permukaannya.

2.3.2 Anomali Bouguer

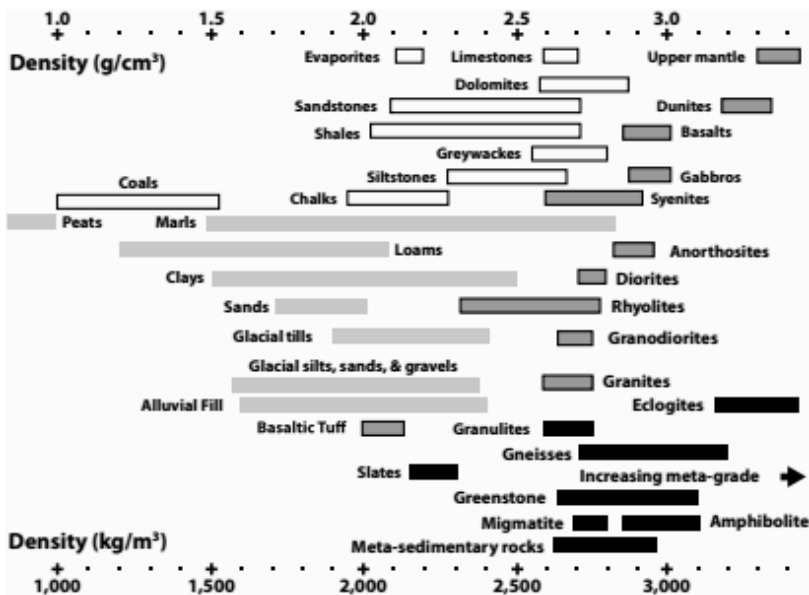
Konsep anomali gaya berat (anomali Bouguer) adalah perbedaan nilai gaya berat terukur dengan nilai gaya berat acuan, yaitu nilai gaya berat teoritis untuk suatu model teoritis bumi (Blakely, 1996). Menurut Hinze (2013), anomali Bouguer adalah selisih antara harga gravitasi pengamatan dengan harga gravitasi teoritis yang didefinisikan pada titik pengamatan tertentu. Perbedaan tersebut merefleksikan variasi rapat massa yang terdapat pada suatu daerah dengan daerah sekelilingnya ke arah lateral maupun vertikal. Sebagai contoh karena keterdapatannya suatu material tertentu seperti batuan sumber panas di dalam kulit bumi. Tujuan akhir penerapan metoda gaya berat pada eksplorasi sumber daya alam maupun studi keilmuan adalah mendapatkan gambaran bawah permukaan berdasarkan variasi persebaran densitas (Hinze, 2013).

Anomali Bouguer bisa bernilai positif ataupun negatif (Hinze, 2013). Nilai anomali positif mengindikasikan adanya kontras densitas yang lebih besar dari densitas rata-rata batuan di sekitarnya, sedangkan anomali negatif menggambarkan perbedaan densitas yang lebih. Anomali ini ditimbulkan oleh keseluruhan massa yang ada di bawah permukaan atau dengan kata lain merupakan gabungan dari anomali regional dan anomali residual. Anomali regional yaitu anomali yang ditimbulkan oleh benda-benda yang letaknya jauh atau dalam, sedangkan anomali residual yaitu anomali yang disebabkan oleh benda-benda dangkal. Dalam proses pengolahan, kedua anomali ini perlu dipisahkan (Subbab 2.4) sehingga anomali yang kita harapkan bisa digunakan dalam pemodelan untuk mendapatkan gambaran kondisi bawah permukaan (Setianingsih, 2013) sesuai dengan target penelitian yang dilakukan.

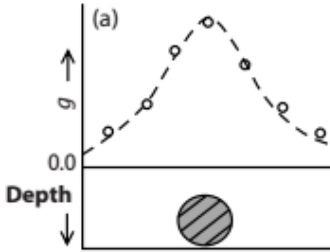
2.3.3 Densitas Batuan

Dalam metoda gaya berat, distribusi parameter fisika yaitu densitas dari material di bawah permukaan bumi berasosiasi dengan kondisi dan struktur geologi di dalam bumi. Hal ini karena nilai percepatan gravitasi terukur di permukaan bumi yang bervariasi dipengaruhi oleh distribusi densitas material (batuan) yang berada di bawah permukaan bumi. Menurut Hinze (2013), nilai densitas setiap batuan dapat dibedakan sesuai dengan jenisnya yang dapat dilihat pada Gambar 2.9. Dengan membandingkan persebaran densitas hasil pengolahan data anomali (dalam penelitian ini anomali residual) dengan nilai densitas referensi (Gambar 2.9), maka kita bisa menginterpretasikan batuan penyusun bawah.

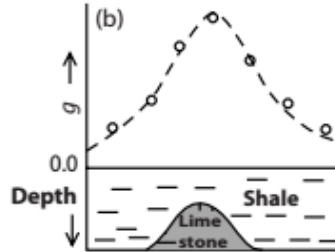
Namun dari hasil pengolahan, data anomali Bouguer yang sama bisa menghasilkan kondisi bawah permukaan penyebab anomali yang berbeda (lihat Gambar 2.10) yang disebut dengan ambiguitas (Grandis, 2009). Hal ini disebabkan karena nilai densitas batuan memiliki nilai rentang yang saling tumpang-tindih antara satu jenis dengan yang lainnya (lihat Gambar 2.9). Kondisi ini akan mempengaruhi keakuratan interpretasi hasil yang akan dilakukan. Oleh karena itu dalam proses interpretasi, nilai densitas yang dihasilkan perlu dikorelasikan dengan informasi geologi yang ada untuk mendapatkan hasil interpretasi yang lebih akurat.



Gambar 2.9. Nilai densitas beberapa batuan (Hinze, 2013)



(a) Akibat benda berbentuk bola



(b) Akibat adanya batu gamping

Gambar 2.10. Ilustrasi ambiguitas penyebab anomali gaya berat (Hinze, 2013)

2.4 Pemisahan Anomali Menggunakan Metode *Second Vertical Derivative*

Sebelum melakukan pemodelan, perlu adanya pemisahan anomali untuk memisahkan anomali residual dari anomali Bouguer. Dalam penelitian ini, pemisahan anomali dilakukan dengan memanfaatkan metode *Second Vertical Derivative* (SVD). Metode ini digunakan untuk memunculkan sumber-sumber anomali yang bersifat dangkal atau lokal sehingga anomali yang dihasilkan dari proses ini adalah anomali residual. Secara teoritis, metode ini diturunkan dari Persamaan Laplace untuk anomali gaya berat di permukaan yang persamaannya dapat ditulis:

$$\nabla^2 \cdot \Delta g = 0 \quad (2.6)$$

atau:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = 0 \quad (2.7)$$

Sehingga *second vertical derivative*-nya diberikan oleh:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = - \left(\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} \right) \quad (2.8)$$

dimana g adalah percepatan gravitasi (m/s^2), x dan y adalah komponen horizontal, dan z adalah komponen vertikal.

Persamaan (2.8) diatas menunjukkan bahwa *second vertical derivative* dari suatu anomali gaya berat permukaan adalah sama dengan negatif dari derivatif orde dua horizon. Artinya bahwa anomali *second vertical derivative* dapat dihasilkan melalui derivatif horizontal yang secara praktis dan lebih mudah (Elkins, 1951). Dalam pemisahan anomali menggunakan metode SVD, berdasarkan persamaan diatas, terdapat beberapa operator yang biasa digunakan seperti yang telah dihitung oleh Elkins (1951), Rosenbach (1952), dan Henderson dan Zeits (1994). Dalam penelitian tugas akhir ini, penulis

menggunakan operator filter SVD hasil perhitungan Elkins yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 dibawah.

Tabel 2.1. Operator filter SVD menurut Elkins (Elkins, 1951)

Operator Filter SVD Menurut Elkins				
0,0000	-0,0833	0,0000	-0,0833	0,0000
-0,0833	-0,0667	-0,0334	-0,0667	-0,0833
0,0000	-0,0334	+1,0668	-0,0334	0,0000
-0,0833	-0,0667	-0,0334	-0,0667	-0,0833
0,0000	-0,0833	0,0000	-0,0833	0,0000

2.5 Pemodelan Inversi 3D

Menke (1984) mendefenisikan teori inversi sebagai suatu kesatuan teknik antara metode matematika dan statistika untuk memperoleh informasi yang berguna mengenai suatu sistem fisika berdasarkan observasi terhadap sistem tersebut. Pemodelan inversi adalah salah satu teknik pemodelan dimana parameter modelnya diperoleh langsung dari data pengamatan (Zarkasyi, 2013). Menurut Grandis (2009), pemodelan inversi sering pula disebut sebagai pencocokan data (data fitting) karena dalam prosesnya adalah mencari parameter model yang menghasilkan respon yang cocok dengan data pengamatan. Respon model dan data pengamatan diharapkan memiliki kesesuaian yang tinggi sehingga akan menghasilkan model yang optimum (Supriyanto, 2007). Pemodelan inversi merupakan fokus kebanyakan atau hampir semua bidang geofisika karena kita dituntut untuk dapat memperkirakan model atau parameter model berdasarkan hasil pengamatan atau pengukuran data lapangan. Salah satu contoh pemodelan inversi yang diaplikasikan dalam penelitian ini adalah memperkirakan model struktur bawah permukaan dalam bentuk persebaran nilai densitas dari data pengukuran metode gaya berat.

Pemodelan struktur bawah permukaan ini dilakukan dengan teknik inversi tiga dimensi (3D). Data gaya berat anomali residual (hasil dari Subbab 2.4) diinversikan menggunakan perangkat lunak *Grablox 1.6* dari Pirttijarvi (2004) sehingga menghasilkan model penampang densitas berbentuk 3D. model 3D yang dihasilkan bisa ditampilkan sebagai penampang 2D maupun 3D. Perangkat lunak *Grablox 1.6* ini menggabungkan dua metode inversi yaitu inversi *Singular Value Decomposition* (SVD) dan inversi Occam (Hjelt, 1992) yang diproses secara berurutan.

Inversi *Singular Value Decomposition* adalah suatu teknik pemfaktoran matriks dengan menguraikan suatu matriks ke dalam dua matriks (Zhao, 2011), sebagai contoh dari matriks A menjadi matriks U dan V. Secara matematis persamaannya (Sugianto, 2015) dapat ditulis sebagai:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T \quad (2.9)$$

dimana \mathbf{U} adalah matriks ortogonal sebelah kiri, \mathbf{S} adalah suatu matriks diagonal, dan \mathbf{V} adalah matriks ortogonal sebelah kanan. Perhitungan inversi matriks menggunakan teknik SVD relatif lebih stabil. Dalam penerapan teknik SVD, nilai singular yang lebih kecil dari harga tertentu dapat diabaikan atau dianggap sama dengan nol sehingga tidak diikutsertakan pada proses perhitungan solusi. Penerapan teknik SVD pada pemodelan inversi (khususnya pada perhitungan matriks) umumnya dapat menghasilkan solusi inversi yang cukup baik (Grandis, 2009).

Inversi Occam adalah suatu metode inversi yang memanfaatkan tingkat kekasaran (roughness) suatu model (Constable, 1987) yang secara matematis dapat ditulis sebagai berikut:

$$\mathbf{U} = \|\delta\mathbf{m}\|^2 + \mu^{-1} \{ \|\mathbf{Wd} - \mathbf{WGm}\|^2 - \mathbf{X}^2 \} \quad (2.10)$$

dimana, $\|\delta\mathbf{m}\|^2$ merupakan kekasaran (roughness), μ^{-1} adalah *Lagrange multiplier*, $\|\mathbf{Wd} - \mathbf{WGm}\|^2$ adalah *missfit*, dan \mathbf{X}^2 adalah error.

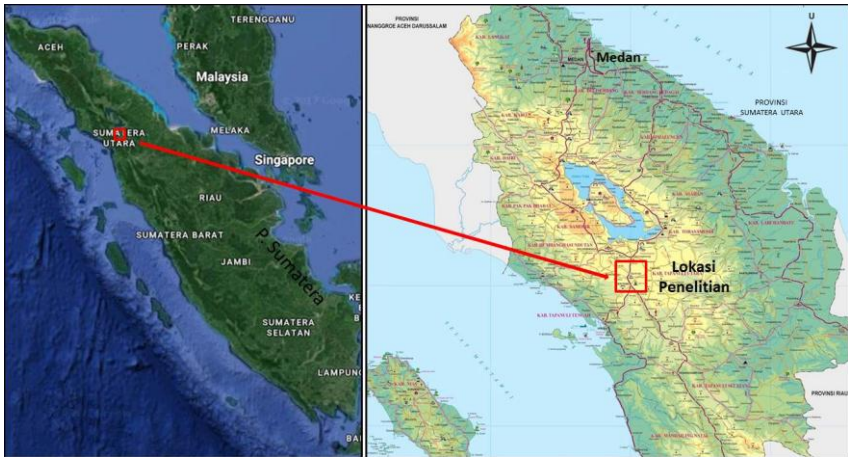
Pemodelan geofisika ini biasanya bersifat tidak unik atau tidak tunggal (Grandis, 2009), artinya suatu respon anomali bisa dihasilkan oleh beberapa model bawah permukaan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. Oleh karena itu, salah satu solusinya adalah penggunaan kedua metode inversi tersebut diatas. Integrasi kedua metode inversi tersebut mampu mengurangi dan menghasilkan nilai error (antara data observasi dengan data hasil perhitungan) yang lebih kecil, baik dari sisi nilai densitas maupun dimensinya melalui proses optimasi. Hasil pemodelan 3D kemudian diintegrasikan dengan data geologi sehingga dapat pilih model densitas yang lebih akurat.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Daerah Penelitian

Lokasi daerah penelitian Tugas Akhir ini adalah daerah panas bumi Sipoholon yang secara administratif terletak di Kecamatan Sipoholon bagian tenggara dan Kecamatan Tarutung bagian utara, Kabupaten Tapanuli Utara, Provinsi Sumatera Utara. Daerah ini berjarak sekitar 280 km sebelah selatan Kota Medan dengan jarak tempuh 7 jam melalui jalur darat. Secara geografis, daerah ini terletak antara $98^{\circ}54'00''$ - $99^{\circ}01'30''$ BT dan $01^{\circ}56'00''$ LU sampai $02^{\circ}06'00''$ LU atau antara 488000 mT - 504000 mT dan 215600 - 232100 mU pada sistem koordinat UTM zona 47 belahan bumi utara.



Gambar 3.1. Lokasi daerah penelitian

Lokasi penelitian ini merupakan salah satu daerah berpotensi panas bumi yang sudah ditetapkan menjadi Wilayah Kerja Pertambangan (WKP) oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Energi Republik Indonesia. Namun sampai saat ini belum dimanfaatkan secara tidak langsung untuk pembangkit listrik. Hal ini diakibatkan karena masih perlunya penelitian lain yang lebih rinci untuk memastikan model konseptual sistem panas bumi daerah ini dan besarnya potensi energi yang bisa dibangkitkan. Daerah penyelidikan yang menjadi fokus penelitian Tugas Akhir ini memiliki ukuran sekitar 14 km (ke arah timur) x 16 km (ke arah utara).

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian Tugas Akhir ini dilaksanakan pada bulan Maret sampai Juni 2017 di Departemen Teknik Geofisika Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Rincian kegiatan penelitian dimulai dari studi literatur, pengumpulan data, pengolahan data, analisis hasil, hingga penyusunan laporan Tugas Akhir secara lengkap (lihat Subbab 3.5).

3.3 Data dan Peralatan

Data-data yang digunakan dalam penelitian Tugas Akhir ini antara lain:

1. Data anomali Bouguer daerah Sipoholon-Tarutung
Data anomali Bouguer ini adalah data hasil penyelidikan metode gaya berat terkoreksi yang dilakukan oleh Tim Penyelidikan Terpadu Pusat Sumber Daya Geologi (PSDG) Bandung pada tahun 2005 lalu. Data ini didapatkan penulis dari Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (nama baru PSDG) Badan Geologi Kementerian Sumber Daya dan Energi Republik Indonesia. Data anomali Bouguer ini dihasilkan dari 230 stasiun pengukuran gaya berat dengan spasi 250 m hingga 500 m menggunakan alat gravitimeter LaCoste & Romberg. Persebaran titik-titik pengukuran yang dilakukan untuk mendapatkan data ini ditunjukkan pada Gambar 4.1.
2. Peta geologi daerah Sipoholon
Peta geologi yang digunakan adalah Peta Geologi yang dibuat oleh PSDG pada tahun 2011 (lihat Gambar 2.2).
3. Data DEM SRTM daerah Sipoholon-Tarutung
Data DEM SRTM yang dipakai adalah SRTM 90m DEM versi 4. Data ini didapatkan secara bebas dari *website* sumber terbuka (open source) yaitu The CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) dengan alamat *website* yaitu <http://srtm.csi.cgiar.org>. Data ini kemudian diolah untuk mendapatkan peta topografi daerah penelitian (lihat Gambar 4.1).

Peralatan dan perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian Tugas Akhir ini antara lain:

1. Komputer/Laptop
Komputer ini digunakan untuk melakukan semua proses yang ada pada subbab 3.5. Komputer ini dilengkapi dengan perangkat-perangkat lunak yang dibutuhkan selama pengerjaan Tugas Akhir seperti yang akan dijelaskan dibawah ini.
2. Surfer 11
Perangkat lunak ini digunakan untuk membuat peta kontur anomali Bouguer, anomali residual, dan anomali regional, membuat data format *.dat, dan melakukan pemisahan (filtering) anomali.

3. Grablox 1.6

Perangkat lunak ini digunakan dalam pengolahan data baik pembuatan model awal dan proses inversi. Perangkat lunak ini merupakan program *open source* yang dibuat oleh Pirttijarvi (2004) dengan menggabungkan 2 (dua) metode inversi yaitu *Singular Value Decomposition* dan inversi Occam (Hjelt, 1992), yang bisa didapatkan secara bebas dan gratis di laman *website*-nya Markku Pirttijarvi (University of Oulu) yaitu <https://wiki.oulu.fi/pages/>. Adapun cara pengolahan data (proses inversi) menggunakan perangkat lunak ini dijelaskan pada Subbab 3.6.

4. Bloxer 1.6

Perangkat lunak ini digunakan untuk menampilkan dan mengedit hasil pemodelan, yang dihasilkan dari program *Grablox*, dalam bentuk 2D maupun 3D. Perangkat lunak ini merupakan program *open source* yang dibuat oleh Pirttijarvi (2004) yang bisa didapatkan di laman *website*-nya Markku Pirttijarvi yaitu <https://wiki.oulu.fi/pages/>.

5. ArcGIS 10.4

Perangkat lunak ini digunakan dalam pembuatan dan tumpang susun peta-peta yang dibutuhkan.

6. Microsoft Office Excel 2010

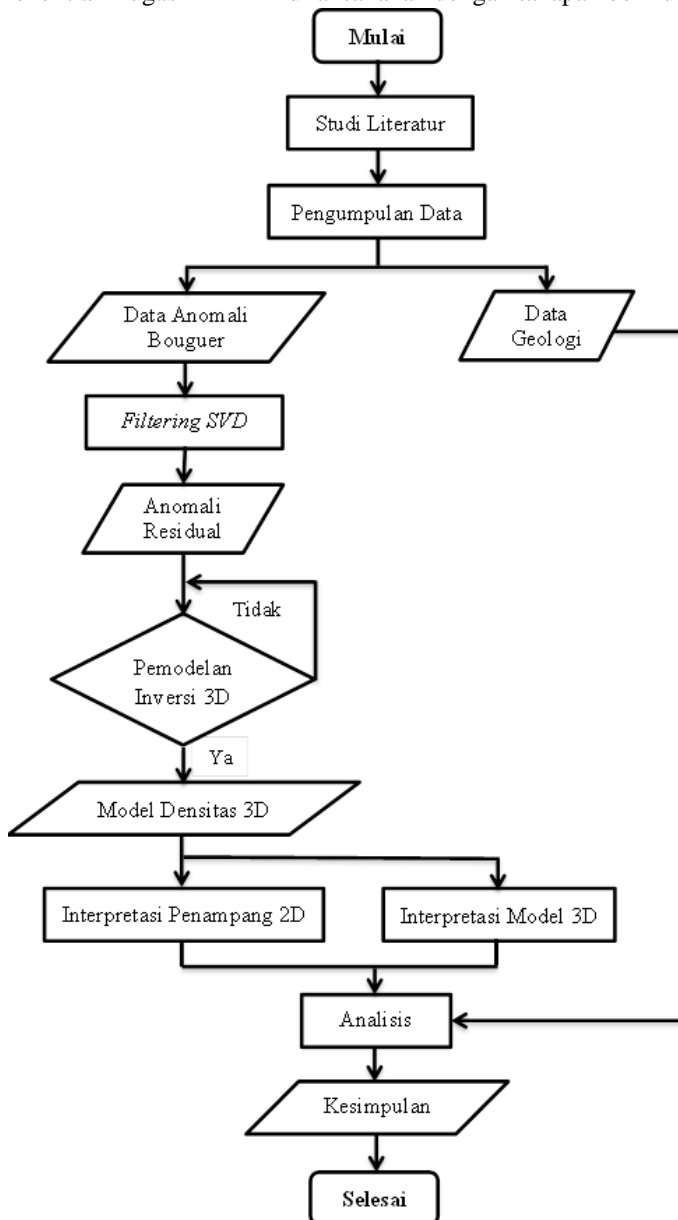
Perangkat lunak ini digunakan untuk mempersiapkan semua data dan hasil dalam bentuk tabel dan grafik.

7. Microsoft Office Word 2010

Perangkat lunak ini digunakan dalam penulisan laporan penelitian Tugas Akhir ini secara lengkap.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Penelitian Tugas Akhir ini dilaksanakan dengan tahapan berikut ini.



Gambar 3.2. Diagram alir penelitian

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur pengerjaan penelitian Tugas Akhir ini (Gambar 3.2) dilakukan sebagai berikut. Pertama sekali adalah melakukan studi literatur. Studi literatur dilakukan dengan mengkaji pustaka berupa jurnal dan buku terkait metode gaya berat, penelitian terdahulu di daerah Sipoholon, dan informasi lain yang mendukung penyelesaian penelitian Tugas Akhir ini. Studi literatur ini dilakukan di Ruang Baca Departemen Teknik Geofisika dan Perpustakaan Pusat ITS. Dari studi literatur ini didapatkan kerangka konsep penelitian yang dilakukan, data yang diperlukan, informasi tentang teknik pengolahan dan teknik analisis data.

Pengumpulan data dilakukan untuk mendapatkan data-data yang dibutuhkan seperti pada subbab 3.3, baik data geofisika maupun data geologi. Adapun data yang dihasilkan antara lain:

1) Data Anomali Bouguer

Data anomali Bouguer yang telah didapatkan, kemudian disalin ulang (koordinat X dan Y, nilai anomali Bouguer) di perangkat lunak Microsoft Excel. Data tersebut kemudian ditampilkan dalam peta kontur menggunakan perangkat lunak *Surfer 11* dengan interpolasi metode Krigging sehingga dihasilkan peta anomali Bouguer seperti pada Gambar 4.2.

2) Peta Geologi

Untuk mendapatkan peta geologi yang terbaru dan lebih jelas, maka dilakukan proses digitasi pada peta geologi yang lama dengan menggunakan perangkat lunak *ArcGIS 10.4*. Kemudian dari hasil digitasi, disusun kembali menjadi sebuah peta geologi baru yang berwarna dan lengkap dengan komponen-komponennya. Hasilnya ditampilkan pada Gambar 2.2.

3) Peta Topografi

Data SRTM 90 DEM yang sudah didapatkan diolah menggunakan perangkat lunak *ArcGIS 10.4* sehingga didapatkan peta topografi seperti pada Gambar 4.1.

Pada penelitian ini, pemisahan anomali dilakukan menggunakan filter *Second Vertical Derivative (SVD)* pada perangkat lunak *Surfer 11* dengan mengaplikasikan operator filter Elkins (Elkins, 1951) yang ditampilkan pada Tabel 2.1. Dari proses pemisahan ini, *output* (keluaran) yang dihasilkan adalah data anomali residual, yang kemudian dipakai dalam proses pemodelan. Anomali residual ini kemudian dibuat menjadi peta kontur menggunakan perangkat lunak *Surfer 11* sehingga hasilnya ditampilkan seperti pada Gambar 4.3. Kemudian anomali residual ini dimodelkan secara 3 dimensi untuk menghasilkan model sebaran densitas bawah permukaan daerah penelitian.

Pada penelitian ini, pemodelan inversi 3D dilakukan menggunakan perangkat lunak Grablox 1.6 dengan data masukan (input) berupa anomali residual (*.dat) dan model awal (*.inp) yang sudah dibuat lebih dahulu sehingga didapatkan keluaran berupa model sayatan penampang densitas secara 2 dimensi (2D) dan 3 dimensi (3D). Penampang 2D adalah sayatan model yang tegak lurus terhadap sumbu X dan Y. Model 3D yaitu sayatan model yang tegak lurus terhadap sumbu Z (berdasarkan kedalaman) dan tampilan model keseluruhan dalam blok mayor. Untuk menampilkan dan melakukan proses *editing* pada hasil pemodelan, dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Bloxer 1.6. Model yang akan ditampilkan pada Bloxer 1.6 ini memiliki format (*.inp) yang merupakan hasil akhir inversi pada perangkat lunak Grablox 1.6. Kemudian kedua jenis penampang ini (2D dan 3D) diinterpretasi secara kualitatif dan kuantitatif.

Interpretasi secara kualitatif dilakukan terhadap beberapa model penampang 2D yang dianggap cukup mewakili daerah penelitian. Interpretasi ini berupa persebaran nilai densitas yang tinggi dan rendah yang berhubungan dengan target penelitian. Sedangkan interpretasi kuantitatif dilakukan terhadap model penampang 3D untuk mendapatkan informasi nilai densitas pada kedalaman dan letak tertentu. Hasil dari kedua jenis interpretasi ini kemudian dianalisis terhadap informasi geologinya baik jenis batuan (Gambar 2.2) maupun topografi (Gambar 4.1). Analisis ini menghasilkan informasi tentang struktur bawah permukaan daerah penelitian yang lebih akurat, khususnya indikasi sumber panas dan zona patahan yang menjadi target dari penelitian Tugas Akhir ini.

3.6 Cara Pengolahan Data

Berikut ini adalah langkah atau cara dalam pengolahan data khususnya dalam proses inversi.

1. Membuat model awal dengan data isian seperti Gambar 3.3.

Pada Gambar 3.3 bagian kiri, X-posit adalah posisi awal sumbu X, Y-posit adalah posisi awal sumbu Y, Z-posit adalah posisi awal sumbu Z, X-size adalah panjang sumbu X, Y-size adalah panjang sumbu Y, Z-size adalah panjang sumbu Z, X-divis adalah banyaknya blok yang membagi sumbu X, Y-divis adalah banyaknya blok yang membagi sumbu Y, Z-divis adalah banyaknya blok yang membagi sumbu Z, Bg dens. adalah densitas yang digunakan pada perhitungan anomali Bouguer (lihat Tabel 4.1), sedangkan Param. adalah densitas rata-rata kerak bumi. Pada Gambar 3.3 bagian kanan, X-step adalah panjang blok minor pada sumbu X, Y-step adalah panjang blok minor pada sumbu Y, X-start adalah posisi awal sumbu X, Y-start adalah posisi awal sumbu Y, X-ending adalah posisi akhir sumbu X, Y-ending adalah posisi akhir sumbu Y, sedangkan Z-level adalah posisi permukaan sumbu Z.

Block model:		Data area:	
X-posit	488	X-step	0.5
Y-posit	216	Y-step	0.5
Z-posit	0	X-start	488
X-size	14	Y-start	216
Y-size	16	X-ending	502
Z-size	4	Y-ending	232
X-divis	28	Z-level	0
Y-divis	32		
Z-divis	10		
Density:			
Bg dens.	2.43		
Param.	2.67		

Gambar 3.3. Parameter model awal

2. Model awal disimpan dalam format *.inp dengan nama tertentu. Jika model ini dibuka pada perangkat lunak Grablox atau Bloxer maka dihasilkan tampilan seperti pada Gambar 4.5.
3. Data anomali residual yang sudah didapatkan dari proses *filtering* dikonversi ke dalam format *.dat dengan isian seperti pada Gambar 3.4.

```

residualsipoholon3
1900          1          2          0 3 0
488          216      -0.2357802315246
488.77777777778 216      0.51107740028731
489.55555555556 216      1.1421200946811
490.33333333333 216      0.38346259723936
491.11111111111 216      0.2636051396096
491.88888888889 216      0.28541767606202
492.66666666667 216      -0.26786710906655
493.44444444444 216      -0.84664426150061
494.22222222222 216      -0.33720760158456

```

Gambar 3.4. Contoh data anomali residual format *.dat

Keterangan:

Baris 1 kolom 1 : nama file *.dat yang akan kita buat (harus sama dengan nama model format *.inp)

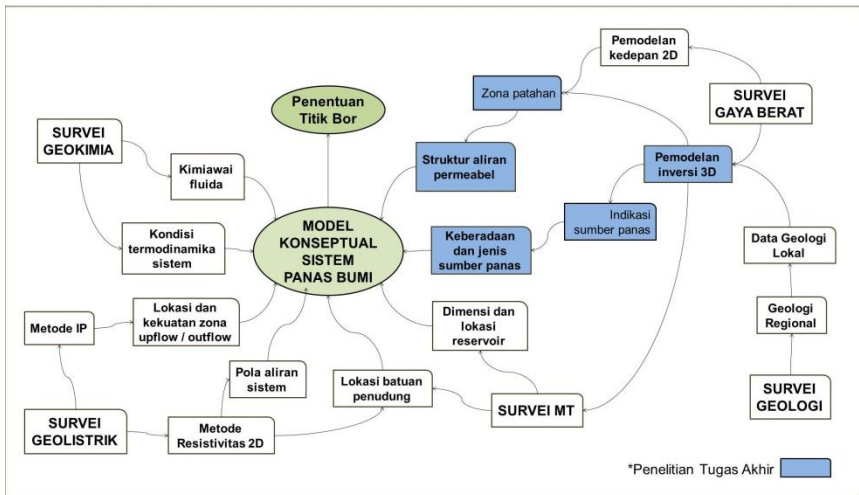
Baris 3 kolom 1 : banyak data residual hasil filtering dari anomali Bouguer (bisa dilihat pada *grid*

	<i>info</i> ketika dibuka di Surfer 11)
Baris 3 kolom 2	: indeks kolom koordinat X (timur)
Baris 3 kolom 3	: indeks kolom koordinat Y (utara)
Baris 3 kolom 4	: indeks kolom koordinat Z (topografi)
Baris 3 kolom 5	: indeks kolom data residual
Baris 3 kolom 6	: menunjukkan tidak ada medan regional
Kolom 1 (baris 5, dst)	: koordinat X dalam UTM (satuan km)
Kolom 2 (baris 5, dst)	: koordinat Y dalam UTM (satuan km)
Kolom 3 (baris 5, dst)	: nilai anomali residual (satuan mgal)

4. Kemudian model awal format *.inp dibuka di perangkat lunak Grablox
5. Data residual format *.dat di-*input* ke dalam model awal.
6. Parameter densitas model yang akan dihasilkan diubah rentangnya menjadi 1,8 – 3,0 gr/cm³, sesuai dengan rentang nilai densitas batuan yang menjadi target penelitian.
7. Data ini diproses dengan mengklik tombol *Compute* yang dimulai dengan jenis optimasi *Base*. Pada saat ini proses inversi sudah dimulai.
8. Setelah proses optimasi *Base* selesai, kemudian meng-klik tombol *Optimize* secara terus menerus hingga nilai *RMS* nya tidak berubah lagi sehingga dihasilkan model seperti pada Gambar 4.6.
9. Selanjutnya dilakukan optimasi *Density*, *Occam d*, *Height*, dan *Occam h* secara berurutan dan bergantian sehingga dihasilkan model seperti pada Gambar 4.7 dan Lampiran 2.
10. Kemudian model ini disimpan dengan nama berbeda dari model awal dan dalam format *.inp.
11. Model yang sudah disimpan kemudian dibuka pada perangkat lunak Bloxer untuk menampilkan hasil sayatan penampang 2D dan juga model 3D-nya.
12. Pada perangkat lunak Bloxer, model dapat diedit sesuai keinginan untuk memberikan tampilan yang lebih baik.

3.7 Peta Jalan Penelitian

Peta jalan (roadmap) penelitian dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.



Gambar 3.5. Peta jalan penelitian tugas akhir

Model konseptual dari sebuah sistem panas bumi sangat diperlukan sesuai dengan penjelasan pada subbab 2.2. model konseptual ini dibangun dari integrasi parameter fisik sistem yang didapatkan dari berbagai studi dan disiplin ilmu. Dari segi ilmu kebumihan, model ini didukung oleh komponen dan data-data hasil survei geologi, geofisika, maupun geokimia. Setiap metode survei ini dilakukan berdasarkan pada target yang ingin dicapai.

Pada penelitian tugas akhir ini, yang menjadi target adalah struktur aliran permeable yang ditandai dengan zona patahan dan indikasi keberadaan sumber panas. Kedua komponen ini bisa didapatkan dari pemodelan 3D data hasil survei gaya berat. Oleh sebab itu, cakupan penelitian tugas akhir ini ditampilkan seperti pada Gambar 3.5 diatas.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Estimasi Densitas Batuan

Untuk keperluan perhitungan anomali Bouguer maupun pemodelan, maka perlu ditentukan densitas rata-rata batuan secara umum di daerah penelitian. Penentuan densitas untuk daerah penelitian ini dilakukan dengan cara mengukur densitas batuan (yang dihasilkan dari sampel representatif dari lapangan) di laboratorium. Hal ini dilakukan terhadap 6 sampel batuan yang diambil pada litologi yang berbeda. Kegiatan ini telah dilakukan oleh Djudjun (2005) di laboratorium Direktorat Inventarisasi Sumber Daya Mineral pada tahun 2005 lalu dengan hasil seperti pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1. Densitas sampel batuan daerah panas bumi Sipoholon
(Djudjun, 2005)

Nomor Kode	Nama Satuan	Koordinat X Y		Lokasi	Densitas (gr/cm ³)
TR-11	Tufa Toba	494888	230908	Silangkitang	1,95
TR-19	Andesit Piroksen	489481	228821	G. Palangka Gading	2,54
TR-28	Andesit Piroksen	499592	222804	Lumban Rao	2,66
TR-47	Ignimbrit Toba	498387	216616	Partuahan	2,22
TR-48	Andesit Piroksen	493654	221629	G. Martimbang	2,76
TR-57	Andesit Piroksen	495174	216648	G. Siborboran	2,46
Densitas Rata-Rata					2,43

Dari Tabel 4.1 diatas, dapat dilihat bahwa variasi nilai densitas batuan di daerah penelitian yaitu berkisar antara 1,95 – 2,76 g/cm³. Densitas tertinggi terdapat pada batuan andesit piroksen dari Gunung Martimbang dengan nilai 2,76 g/cm³, sedangkan densitas terendah terdapat pada batuan tufa Toba dari daerah Silangkitang dengan nilai 1,95 g/cm³. Sehingga apabila dirata-ratakan, maka akan dihasilkan densitas secara umum sebesar 2,43 g/cm³. Densitas rata-rata ini kemudian digunakan dalam perhitungan untuk mendapatkan nilai anomali Bouguer dari data pengukuran dan menjadi parameter awal pada pemodelan inversi 3D.

4.2 Data Anomali Bouguer

Data gaya berat pada daerah penelitian ini dihasilkan dari 230 titik stasiun pengukuran seperti pada Gambar 4.1. Apabila kita perhatikan, persebaran titik pengukuran gaya berat lebih fokus ke bagian tengah dari area yang menjadi objek penelitian. Bagian tengah merupakan bagian yang menjadi daerah paling kompleks karena terdeformasi langsung akibat proses pembentukan Sistem Sesar Sumatera. Dengan latar belakang kondisi geologi tersebut, maka untuk memperoleh informasi bawah permukaan yang lebih mewakili dibuatlah desain lintasan akuisisi data yang memotong struktur geologi yang ada dan juga beberapa titik secara regional.

Desain akuisisi data gaya berat ini memiliki spasi 250 m hingga 500 m yang terdiri dari 7 lintasan berarah barat-timur (177 stasiun teratur) dan titik regional (53 stasiun acak) yang tersebar di sekitar graben Tarutung. Data gaya berat pengukuran lapangan ini didapatkan menggunakan alat gravitimeter LaCoste & Romberg. Data yang didapatkan kemudian di konversi ke satuan milligal sesuai dengan panduan pemakaian alat. Data hasil pengukuran lapangan kemudian direduksi dengan beberapa koreksi yang umum dilakukan, termasuk koreksi terrain (medan). Koreksi terrain atau yang disebut juga topografi ini dilakukan karena penelitian ini terletak pada daerah perbukitan yang memiliki topografi yang tidak teratur (Gambar 4.1).

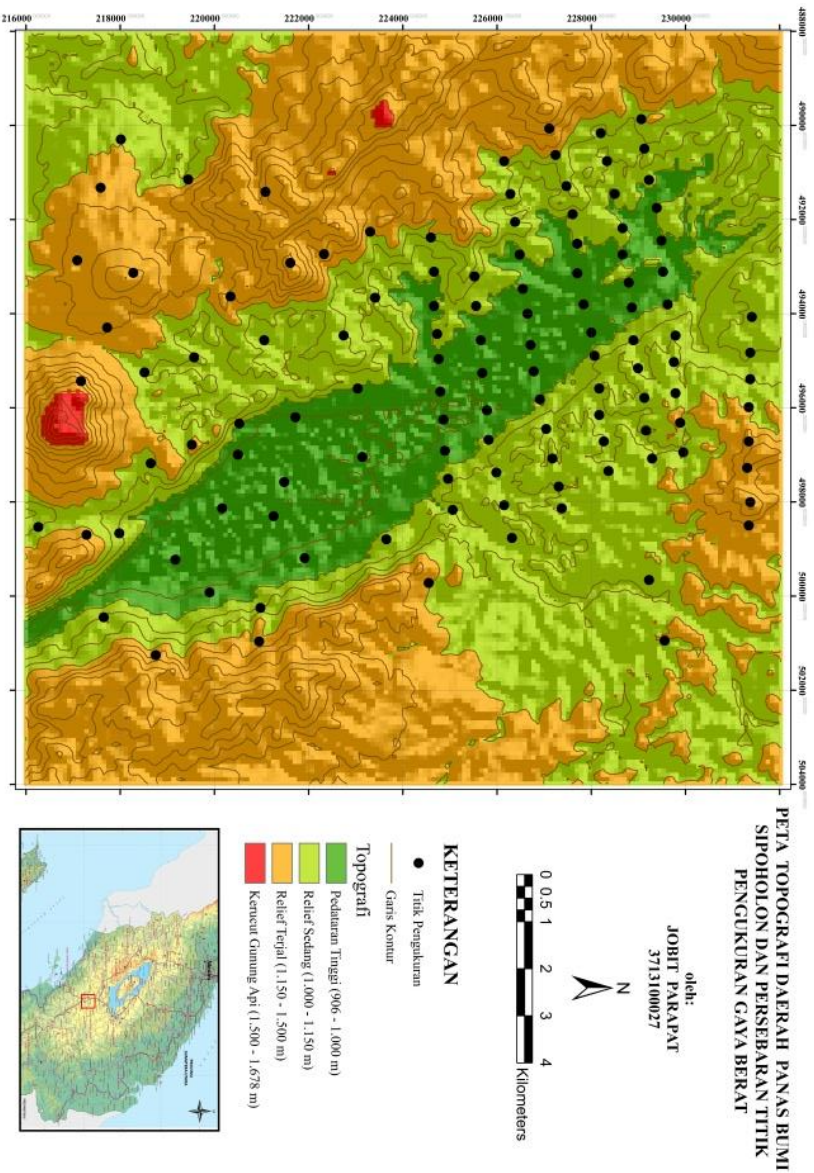
Berdasarkan rentang nilai ketinggian (topografi), daerah penyelidikan ini dibagi menjadi 4 (empat) satuan morfologi (Tim Penyelidikan Terpadu PSDG, 2005) seperti pada Gambar 4.1 dengan rincian sebagai berikut.

1) Satuan Pedataran Rendah

Satuan ini terdapat pada bagian tengah daerah penelitian yaitu di sepanjang graben Tarutung yang merupakan bagian paling rendah di daerah tersebut. Satuan ini memiliki kemiringan lereng antara $0^{\circ} - 15^{\circ}$ dengan luas sekitar 15% dari total daerah penelitian dan memiliki elevasi antara 906 m hingga 1.000 m di atas permukaan laut. Pada morfologi ini terdapat lembah sungai berbentuk U, lereng sungai datar, hingga landai yang dijumpai dalam bentuk aliran sungai bermeander. Satuan ini tersusun dari endapan permukaan yang berupa material lepas hasil rombakan batuan di bagian hulu sungai dengan fragmen membundar hingga membundar tanggung.

2) Satuan Perbukitan Relief Sedang

Satuan ini tersebar di sebelah barat daya dan timur laut graben Tarutung. Satuan ini memiliki kemiringan lereng antara $15^{\circ} - 30^{\circ}$ dengan luas sekitar 45% dari total daerah penelitian dan memiliki elevasi 1.000 m sampai 1.150 m di atas permukaan laut. Satuan ini tersusun dari satuan tufa Toba dan sinter karbonat. Secara umum, lembah sungai berbentuk V sampai U terutama di bagian topografi yang lebih rendah, dengan pola aliran sungai berbentuk trellis sampai subdendritik.



Gambar 4.1. Peta topografi daerah Sipoholon-Tarutung dan persebaran titik pengukuran gaya berat

3) Satuan Perbukitan Relief Tinggi

Satuan ini tersebar di bagian barat daya dan timur graben Tarutung. Satuan ini memiliki kemiringan lereng antara 30^0 - 45^0 dengan luas sekitar 35% dari total daerah penelitian dan memiliki elevasi 1.150 m sampai 1.500 m di atas permukaan laut. Satuan ini tersusun dari batuan beku andesitik. Secara umum, lembah sungai berbentuk V menandakan makin ke bagian dasar lembah batuan semakin lunak, dengan pola aliran sungai berbentuk radial hingga trellis.

4) Satuan Kerucut Gunung Api

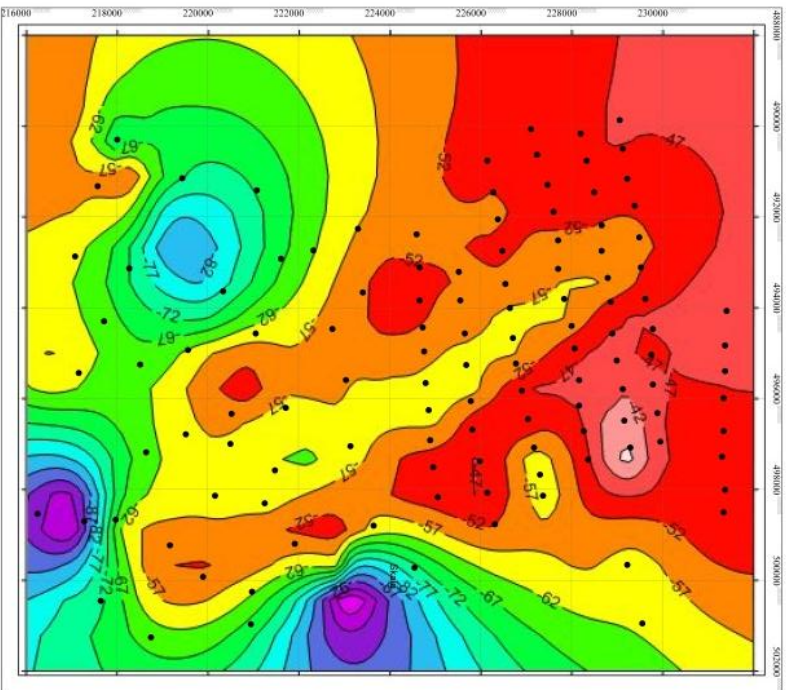
Satuan ini tersebar di daerah puncak beberapa gunung api. Satuan ini memiliki kemiringan lereng antara 45^0 - 60^0 dengan luas sekitar 5% dari total daerah penelitian dan memiliki elevasi sekitar 1.500 m sampai 1.678 m di atas permukaan laut. Satuan ini tersusun dari lava andesitik berstruktur kekar lembar produk Gunung Martimbang dan Gunung Siborboran dengan pola aliran sungai berbentuk radial.

Oleh karena itu perbedaan topografi tersebut, maka koreksi terrain ini dilakukan untuk mengoreksi adanya pengaruh penyebaran massa yang tidak teratur di sekitar titik pengukuran. Koreksi terrain pada data gaya berat ini menggunakan metode *Hammer Chart* dengan jari-jari luar maksimum 10 km dan densitas rata-rata $2,43 \text{ g/cm}^3$ (dari Tabel 4.1) sehingga dihasilkan data anomali Bouguer pada setiap titik pengukuran. Kemudian data anomali Bouguer ditampilkan dalam peta kontur menggunakan perangkat lunak Surfer 11 dengan interpolasi metode Krigging, sehingga dihasilkan peta anomali Bouguer seperti pada Gambar 4.2 dibawah.

Gambar 4.2 memperlihatkan bahwa peta anomali Bouguer Sipoholon untuk densitas $2,43 \text{ g/cm}^3$ memiliki nilai anomali antara -112 mgal sampai -37 mgal dan spasi kontur 5 mgal. Anomali Bouguer ini memperlihatkan anomali negatif dan dapat dikelompokkan menjadi 3 bagian yaitu anomali negatif: tinggi, sedang, dan rendah (Djudjun, 2005).

Pertama, anomali negatif tinggi ini memiliki rentang nilai antara -37 sampai -47. Anomali ini menyebar pada bagian utara-barat yaitu di sekitar mata air panas Sipoholon mulai lintasan A di utara bagian barat, lintasan B bagian timur, lintasan C bagian timur, lintasan D bagian bagian tengah dan ujung barat lintasan B sekitar Gunung Palangka Gading hingga ke arah utara. Dari persebaran tersebut, anomali negatif tinggi di sekitar mata air panas Sipoholon memperlihatkan daerah anomali yang cukup luas.

Kedua, anomali negatif sedang memiliki rentang nilai antara -42 sampai -77. Anomali ini hampir mendominasi daerah penelitian, yaitu sekitar 80%, dari total daerah penelitian yakni dari utara sampai ke selatan dan barat ke arah timur.

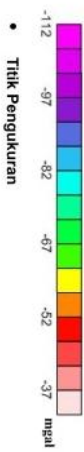


**PETA ANOMALI BOUGUER LENGKAP
DENSITAS 2,43 gr/cm³
DAERAH PANAS BUMI SIPOHOLON
KAB. TAPANULI UTARA**

oleh:
JOBIT PARAPAT
3713100027



KETERANGAN:



Gambar 4.2. Peta anomali Bouguer densitas 2,43 g/cm³ daerah Sipoholon

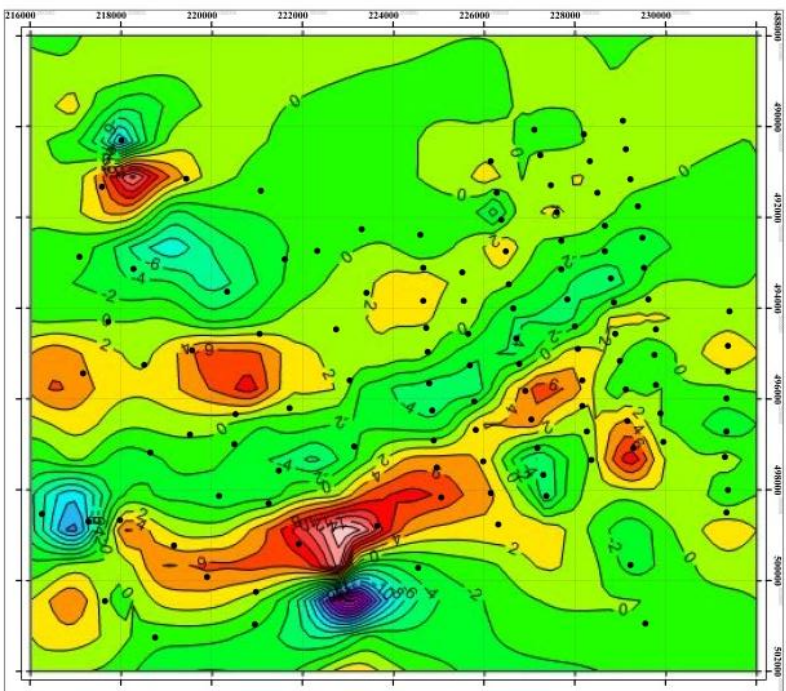
Ketiga, anomali negatif rendah memiliki rentang nilai antara -77 sampai -112. Anomali ini tampak mengelompok pada 3 lokasi di bagian selatan-tenggara daerah penelitian, yakni di sekitar titik amat R13 sampai R15 yaitu di bagian selatan-barat daya; di sekitar R29 (Huta Sihombing – Salib kasih) di bagian tenggara-timur; dan di sekitar Dolok Sitoride di bagian selatan daerah penelitian.

Secara umum, pola lineasi anomali Bouguer memperlihatkan arah barat laut-tenggara dan di beberapa tempat seperti di Sipoholon, Hutabarat, dan Parbubu-1 terjadi pembelokan dan pengkutuban antara anomali negatif rendah dan tinggi. Kondisi yang seperti ini mengindikasikan adanya struktur geologi berupa sesar yang cukup kompleks di sekitar lokasi tersebut (Djudjun, 2005). Hal ini didukung oleh data-data geologi permukaan ataupun peta geologi yang mengindikasikan adanya sesar di daerah tersebut.

4.3 Hasil Pemisahan Anomali

Anomali Bouguer yang sudah didapatkan merupakan penjumlahan dari semua kemungkinan sumber anomali yang ada di bawah permukaan yaitu anomali regional dan residual (Hinze, 2013). Sehingga untuk kepentingan interpretasi target yang sudah ditentukan, maka anomali tersebut perlu dipisahkan (Setianingsih, 2013). Untuk melakukan pemisahan anomali tersebut, dalam penelitian tugas akhir ini digunakan metode *second vertical derivative* (SVD) seperti yang sudah dijelaskan pada Subbab 2.4 dan Subbab 3.5 dengan aplikasi operator filter Elkins (Tabel 2.1). Hasil langsung dari pemisahan anomali menggunakan metode SVD ini adalah anomali residual.

Anomali residual merupakan anomali lokal yang dipengaruhi oleh sumber-sumber anomali gravitasi yang berada pada posisi dangkal. Anomali residual ini ditampilkan dalam peta kontur menggunakan perangkat lunak *Surfer 11* dengan interpolasi menggunakan metode Krigging, sehingga dihasilkan peta anomali residual seperti pada Gambar 4.3 dibawah. Dalam tugas akhir ini, data anomali residual inilah yang kemudian digunakan dalam pemodelan inversi 3D sebagai data masukan seperti yang dijelaskan pada Subbab 3.5 untuk mendapatkan model bawah permukaan daerah penelitian. Hal ini karena menurut hipotesis penulis bahwa dengan menggunakan anomali residual maka target penelitian (berupa indikasi sumber panas dan zona patahan) yang akan dianalisis sudah bisa didapatkan. Sama halnya dengan anomali Bouguer, peta penyebaran anomali residual juga menggunakan densitas rata-rata sebesar $2,43 \text{ g/cm}^3$ hasil pengukuran di laboratorium (Tabel 4.1).



**PETA ANOMALI RESIDUAL
DENSITAS 2,43 gr/cm³
DAERAH PANAS BUMI SIPOHOLON
KAB. TAPANULI UTARA**

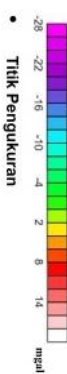
oleh:
JOBRI PARAPAT
3713100027



Skala



KETERANGAN:



• Titik Pengukuran



Gambar 4.3. Peta anomali residual densitas 2,43 g/cm³ daerah Sipoholon

4.4 Hasil Pemodelan

4.4.1 Model Awal

Ukuran daerah penelitian yang akan dimodelkan adalah sekitar 14 km ke arah timur (sumbu X) dan 16 km ke arah utara (sumbu Y), sedangkan target kedalaman model adalah 4 km ke arah vertikal (sumbu Z). Kedalaman model dibatasi hanya 4 km saja karena menurut hipotesis penulis bahwa pada kedalaman ini target penelitian (berupa indikasi sumber panas dan zona patahan) yang akan dianalisis sudah bisa didapatkan. Panjang sumbu X, Y, dan Z merupakan ukuran model blok mayor (dX , dY , dZ). Model awal yang dibuat menggunakan perangkat lunak *Grablox 1.6* mewakili keseluruhan daerah penelitian. Untuk model awal, sumbu X dibagi menjadi 28 blok (n_x), sumbu Y menjadi 32 blok (n_y), dan sumbu Z menjadi 10 blok (n_z) sehingga menghasilkan 8960 blok minor penyusun blok mayor seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.4.

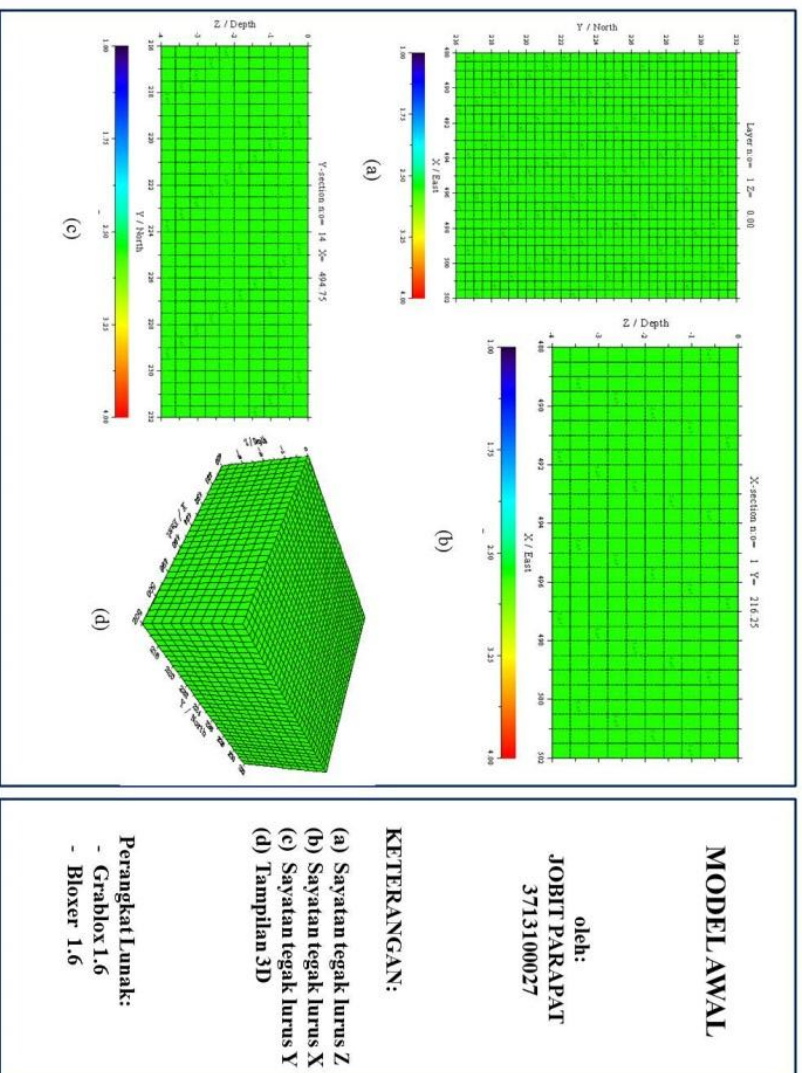
Gambar 4.4 (a) merupakan tampilan sayatan tegak lurus sumbu Z yang mewakili 10 sayatan dan menunjukkan bahwa variasi densitas sebagai fungsi kedalaman. Gambar 4.4 (b) merupakan sayatan tegak lurus sumbu X yang mewakili 28 sayatan dengan informasi densitas dan kedalaman model pada arah melintang. Gambar 4.4 (c) merupakan sayatan tegak lurus sumbu Y yang mewakili 32 sayatan dengan informasi densitas dan kedalaman model pada arah membujur. Gambar 4.4 (d) merupakan tampilan tiga dimensi (3D) model awal pada perangkat lunak *Bloxer 1.6*, dimana blok mayor tersebut terdiri dari 8960 blok minor, yang memberikan informasi bawah permukaan bumi secara keseluruhan dan terlihat lebih nyata dibanding dengan model sayatan.

Proses pembuatan model awal ini dilakukan dengan cara coba-coba dengan memasukkan dimensi model, parameter densitas batuan rata-rata (Tabel 4.1), dan informasi geologi daerah penelitian sehingga didapatkan model yang lebih cocok yang dianggap dapat mewakili model bawah permukaan. Model awal ini kemudian akan dipakai pada proses pemodelan inversi.

4.4.2 Hasil Pemodelan Inversi 3D

Dari peta anomali residual yang sudah di-*grid* di Surfer 11, didapatkan data hasil interpolasi menggunakan metode Krigging sebanyak 1900 titik data. Data tersebut digunakan sebagai data masukan (input) pada proses pemodelan. Pemodelan inversi dilakukan menggunakan perangkat lunak *Grablox 1.6* dengan data masukan (input) berupa model awal (*.inp) yang sudah dibuat diawal dan anomali residual (*.dat). Setelah proses komputasi selesai, maka akan dihasilkan respon model seperti pada Gambar 4.5.

Proses komputasi tersebut menghasilkan rentang nilai gravitasi dengan satuan mgal. Terlihat bahwa nilai hasil pengukuran tidak terlalu jauh berbeda dengan nilai hasil perhitungan (komputasi), sehingga bisa dikatakan bahwa kedua model terlihat cocok atau dianggap sesuai dan mendekati. Gambar 4.5



Gambar 4.4. Model awal menggunakan *Grablox 1.6* dan tampilan 3D pada *Bloxer 1.6*

menunjukkan: (a) peta persebaran anomali dari hasil pengukuran, (b) peta persebaran anomali dari hasil perhitungan (komputasi), (c) peta persebaran perbedaan nilai anomali antara hasil pengukuran dengan perhitungan, dan (d) kurva perbandingan nilai anomali antara hasil pengukuran dengan perhitungan. Untuk mendapatkan model dengan persebaran densitas, maka perlu dilakukan proses inversi dengan teknik optimasi yang tersedia.

Beberapa tahapan optimasi yang dilakukan pada pemodelan inversi ini yaitu optimasi Base, Density, Height, Occam's d dan Occam's h. Proses optimasi ini dilakukan menggunakan metode *singular value decomposition* (SVD) dan optimasi Occam's (Hjelt, 1992) dengan cara ber-urutan (tidak boleh acak). Hal ini karena pada perangkat lunak Grablox kedua proses tersebut dilakukan secara bertahap dengan menggunakan persamaan (2.9) dan (2.10). Jika pada optimasi dengan SVD dihasilkan data densitas perhitungan (komputasi) dengan data pengukuran belum cocok, maka dilakukan optimasi Occam hingga kedua data tersebut hampir cocok atau cocok. Proses optimasi ini akan membuat nilai *error* (antara data observasi dengan data hasil perhitungan) menjadi semakin kecil baik dari sisi nilai densitas maupun dimensinya. Nilai *error* (rms) minimum antara keduanya menunjukkan kesesuaian data, sehingga model densitas dari hasil tersebut dianggap sebagai model yang paling optimum.

Proses optimasi yang dilakukan memiliki peran masing-masing dengan optimasi dasar (Base), densitas (Density), Occam densitas (Occam d), ketinggian blok (Heights) dan Occam ketinggian blok (Occam h). Optimasi Base bertujuan untuk mengoptimalkan nilai-nilai parameter dasar anomali. Optimasi densitas bertujuan untuk mengoptimasi nilai densitas agar nilai densitas antara data pengukuran dan data perhitungan lebih mendekati atau cocok. Optimasi ketinggian blok bertujuan untuk mendapatkan posisi blok yang memiliki ketinggian yang sesuai. Occam's d dan Occam's h bertujuan untuk memperkecil perbedaan antara kedua data tersebut (densitas dan ketinggian blok), sehingga didapatkan kecocokan antara keduanya (Jusmi, 2016).

Banyaknya jumlah blok minor dan jumlah iterasi yang ditentukan akan mempengaruhi ketelitian hasil model, data output dan lamanya waktu inversi. Semakin besar jumlah blok minornya, maka hasil pemodelan akan semakin bagus dan cukup detail, namun waktu yang dibutuhkan untuk melakukan proses pemodelan inversi atau *Optimize* akan lebih lama dibandingkan dengan jumlah blok yang lebih sedikit. Demikian juga halnya jika jumlah iterasinya semakin banyak. Dalam penelitian tugas akhir ini, jumlah blok yang dibuat sebanyak 8960 blok dan dibatasi sampai 40 iterasi. Hal ini dilakukan karena keterbatasan komputer penulis dalam proses pemodelan sehingga tidak mampu mengolah dalam waktu yang cukup lama.

Dalam pemodelan ini, dibutuhkan waktu inversi berbeda-beda untuk setiap jenis optimasi. Pada optimasi Base dibutuhkan waktu selama 9,36 detik,

HASIL KOMPUTASI DASAR

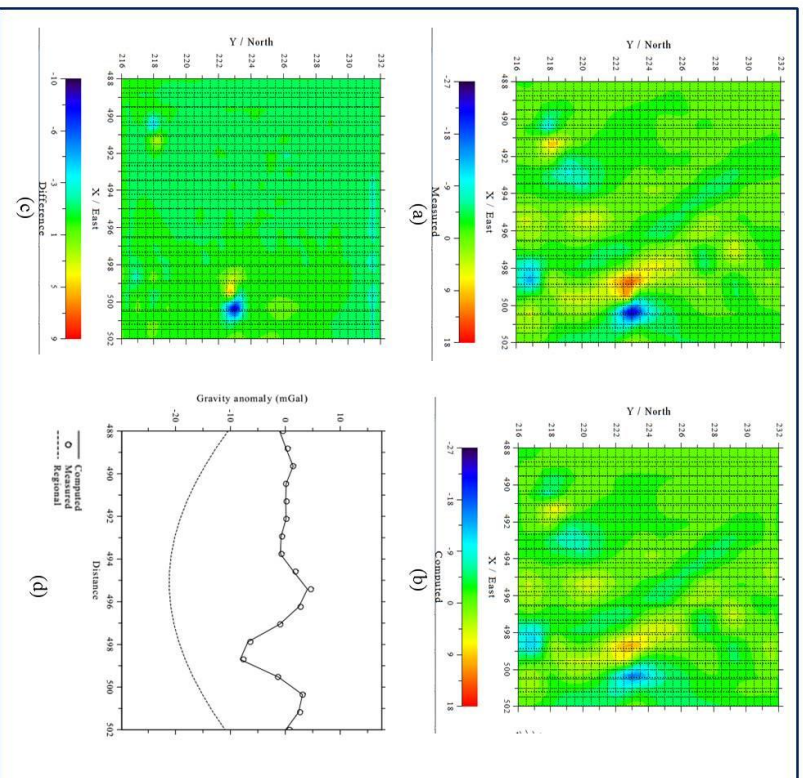
oleh:
JOBIT PARAPAT
3713100027

KETERANGAN:

- (a) Hasil Pengukuran
- (b) Hasil Perhitungan
- (c) Perbedaan Nilai Kedua Model
- (d) Kurva Perbandingan

Perangkat Lunak:

- Grablox 1.6
- Bloxer 1.6



Gambar 4.5. Hasil komputasi dasar

optimasi Density selama 14 jam 35 menit, optimasi Occam d selama 1 jam, optimasi Height selama 6 jam 3 menit, dan optimasi Occam h selama 30 menit. Dengan demikian, total waktu yang dibutuhkan untuk proses inversi ini adalah selama 22 jam 10 menit 9,36 detik (kurang lebih 1 hari). Di akhir dari proses optimasi Occam h ini, nilai error (rms) model yang dihasilkan yaitu sebesar 0,2 % dan nilai error (rms) data sebesar 3 %. Sehingga dapat dikatakan bahwa model persebaran densitas yang dihasilkan sudah sangat baik dan bisa dipertanggungjawabkan. Hasil akhir model tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.6.

4.5 Interpretasi Penampang Model 2D

Model densitas yang dihasilkan dari proses inversi pada perangkat lunak *Grablog 1.6* hanya memiliki perpotongan pada dua arah saja sehingga sayatan model penampang 2D yang bisa dihasilkan hanya secara vertikal (berpotongan sumbu X dan Y) dan horizontal (berpotongan sumbu Z). Hal ini membuat arah penampang yang ingin dianalisis tidak boleh sembarangan, tetapi harus mengikuti arah sayatan yang sudah ditentukan oleh perangkat lunak. Dalam pembuatan model awal (Gambar 4.4), sumbu X dibagi menjadi 28 blok sehingga pada model akhir dihasilkan 28 penampang sayatan 2D yang tegak lurus dengan sumbu Y. Demikian halnya dengan sumbu Y (dibagi 32 blok) menghasilkan 32 penampang sayatan 2D dan sumbu Z (dibagi 10 blok) menghasilkan 10 penampang sayatan. Sehingga terdapat total 70 penampang sayatan 2D yang dihasilkan dari pemodelan, dimana 60 penampang berarah vertikal dan 10 penampang berarah horizontal (Gambar 4.4). Namun, tidak semua penampang akan diinterpretasi melainkan hanya beberapa saja yang dianggap lebih mewakili kondisi bawah permukaan daerah penelitian.

Ada beberapa hal pertimbangan yang dilakukan penulis sebelum menentukan arah orientasi sayatan penampang 2D. Beberapa hal tersebut antara lain arah dan persebaran sesar, orientasi graben Tarutung, tipe *geothermal play* dan morfologi daerah penelitian.

Menurut Hasan (2005), struktur utama yang mengontrol kondisi geologi di daerah penelitian adalah Sistem Sesar Sumatera. Pada daerah penelitian, sesar utama ini menyebabkan terbentuknya sesar-sesar kecil yang arahnya secara umum mengikuti arah orientasi sesar utama yaitu berarah barat laut-tenggara, meskipun ada beberapa sesar yang arahnya berbeda karena pengaruh arah gaya tambahan pada saat pembentukan. Sesar-sesar kecil pada daerah ini berjumlah 12 buah yang terbagi kedalam 4 arah kemenerusan (Gambar 2.1 dan Gambar 2.2). Adapun sesar yang berarah barat laut-tenggara yaitu sesar Sipoholon, Sibatu-Batu, Sigeaon, Toru, Siborboron, dan Jorbing. Sesar berarah timur laut-barat daya yaitu sesar Pintubosi dan Hutabarat. Sesar berarah utara-selatan yaitu sesar Tarutung, Martimbang dan Sibadak. Sesar berarah barat-timur yaitu sesar Parbubu. Seluruh sesar ini bisa jadi mengalami kemenerusan

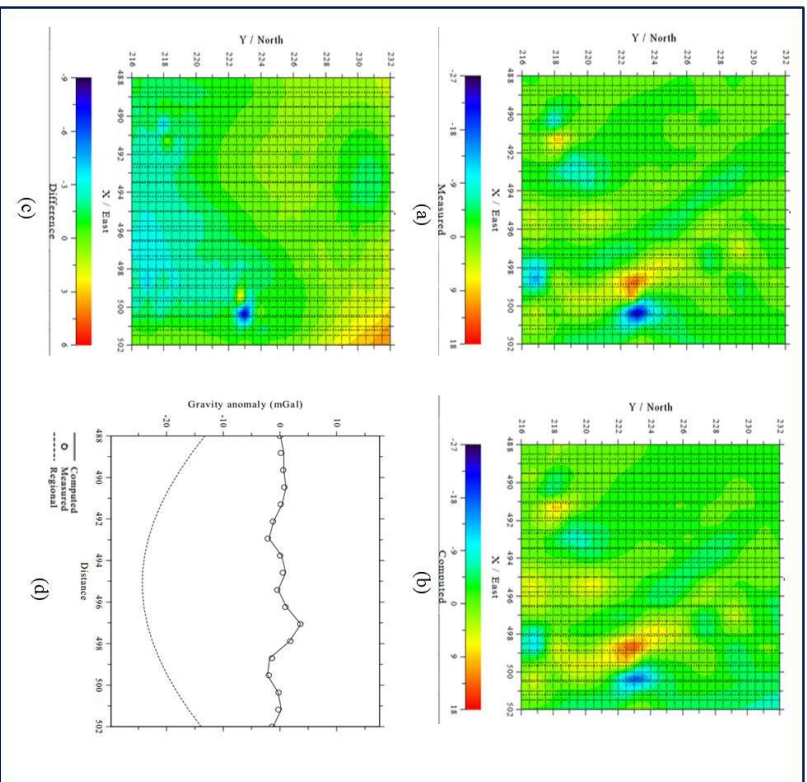
HASIL OPTIMASI AKHIR

oleh:
JOBIT PARAPAT
3713100027

KETERANGAN:

- (a) Hasil Pengukuran
- (b) Hasil Perhitungan
- (c) Perbedaan Nilai Kedua Model
- (d) Kurva Perbandingan

Perangkat Lunak:
- Grablox 1.6
- Bloxer 1.6



Gambar 4.6. Model hasil akhir optimasi Occam h

sampai di kedalaman tertentu (lihat Gambar 2.5) sehingga akan mempengaruhi kondisi struktur bawah permukaan. Oleh karena itu, arah dan orientasi sesar ini menjadi salah satu pertimbangan penting dalam menentukan arah sayatan penampang 2D yang diinterpretasi.

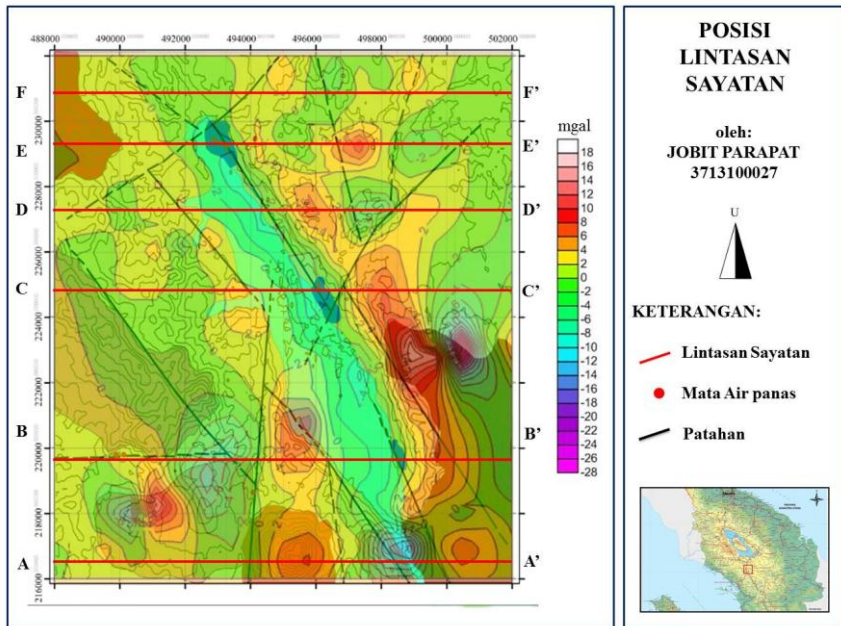
Graben Tarutung ini terbentuk di zona peregangan, yang terjadi akibat gaya tarikan (ekstensi) yang saling berlawanan yaitu ke arah barat dan timur. Proses peregangan ini (Gambar 2.3) mempengaruhi kondisi bawah permukaan dimana batuan penyusunnya tidak lagi selaras karena sebagian sudah mengalami penurunan yang membentuk cekungan atau graben. Graben ini merupakan daerah rendah yang disusun oleh beberapa bidang turun dari setiap patahan normal (turun) yang ada (Nukman dan Moeck, 2013), sehingga struktur bawah permukaannya menjadi cukup kompleks (lihat Gambar 2.5). Dari peta topografi (Gambar 4.1), graben ini memiliki geometri yang panjang namun sempit dengan kedua ujungnya diduga merupakan pertemuan dua patahan. Graben ini berada persis di dalam Sistem Sesar Sumatera, sehingga arahnya juga mengikuti arah sesar tersebut yaitu barat laut-tenggara. Oleh karena itu, keberadaan dan arah kemenerusan struktur graben Tarutung ini juga menjadi salah satu pertimbangan penting dalam penentuan arah sayatan penampang 2D yang diinterpretasi.

Berdasarkan beberapa tipe *geothermal play* yang diberikan oleh Moeck (2013), maka daerah Sipoholon bisa dikelompokkan ke dalam tipe *Extensional Domain Play*. Tipe ini termasuk kedalam sistem dominasi konveksi yaitu bahwa ada aliran siklus air permukaan pada kondisi dangkal maupun dalam secara natural akibat ada sumber panas di bawah permukaan bumi. Tipe ini merupakan kondisi sistem yang terbentuk akibat terjadinya peregangan dan penipisan kerak bumi, sehingga mantel, yang sangat panas akibat kandungan magma, mengalami pengangkatan yang menyebabkan gradien panas di daerah tersebut lebih tinggi dari biasanya. Peregangan di daerah Sipoholon ini terjadi karena adanya gaya yang saling tarik-menarik yang berlawanan (Gambar 2.3) dengan arah relatif barat daya-timur laut. Akibat gaya yang berlawanan ini, maka akan terbentuk struktur patahan yang relatif saling turun terhadap yang lain, dengan arah yang tegak lurus terhadap gaya yang bekerja yaitu barat laut-tenggara.

Morfologi daerah penelitian seperti yang dijelaskan pada subbab 4.2 dan diperlihatkan pada Gambar 4.1 dibagi menjadi 4 (empat) bagian umum. Pembagian tersebut dilakukan berdasarkan ketinggian masing-masing di atas permukaan laut. Secara umum pola kemenerusan setiap jenis satuan morfologi berorientasi barat laut-tenggara. Pola ini mengikuti keberadaan dan kemenerusan struktur graben Tarutung yang ada di daerah penelitian.

Oleh karena pertimbangan dari beberapa kondisi geologi di atas, dimana hampir secara umum struktur geologinya berorientasi barat laut-tenggara, maka untuk keperluan interpretasi model bawah permukaan secara 2D diambil arah

sayatan dengan orientasi barat-timur atau tegak lurus terhadap sumbu Y (lihat Gambar 4.7). Diharapkan dengan demikian, seluruh struktur geologi dapat terlihat pada penampang model mulai dari permukaan hingga batas kedalaman model.

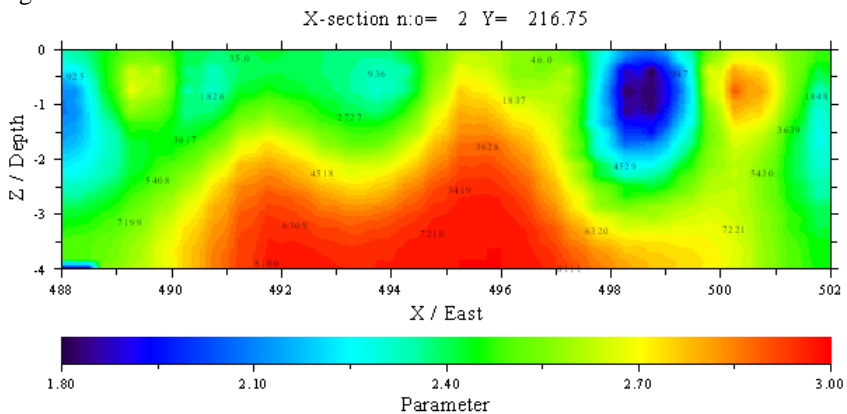


Gambar 4.7. Posisi sayatan penampang vertikal 2D

Dari total penampang vertikal dan horizontal model 2D, kemudian dipilih beberapa penampang yang dianggap mewakili kondisi bawah permukaan untuk diinterpretasi. Dalam penelitian ini, diambil masing-masing 6 (enam) penampang sayatan vertikal yang berpotongan dengan sumbu Y dan 5 penampang horizontal (tegak lurus sumbu Z). Keenam sayatan penampang yang dianggap cukup mewakili tersebut yaitu lintasan A-A', B-B', C-C', D-D', E-E', dan F-F' pada koordinat berturut-turut 216,75; 219,75; 225,25; 227,25; 229,25 dan 230,75 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7. Sayatan dipilih berdasarkan perbedaan kontur warna yang dilewati, manifestasi permukaan yang ada, dan persebaran densitas pada penampang hasil pemodelan. Perbedaan nilai anomali residual tersebut juga bisa menjadi indikasi bahwa terdapat perbedaan densitas yang dimiliki oleh batuan-batuan penyusun geologi permukaan daerah penelitian.

Penampang model hasil sayatan lintasan A-A' hingga F-F' secara berturut-turut yang merupakan model 2D dengan densitas pada permukaan hingga kedalaman tertentu. Model tersebut ditampilkan dengan menggunakan perangkat lunak *Bloxer 1.6* dengan tampilan setiap kotak memiliki nilai densitas masing-masing sehingga perbedaan setiap densitas dapat terlihat dengan lebih jelas.

Penampang model 2D lintasan A-A' yang terdapat pada $Y = 216,75$ (Gambar 4.7) ditunjukkan oleh Gambar 4.8. Berdasarkan pada peta geologi daerah panas bumi Sipoholon (Gambar 2.2), sayatan penampang ini melintasi daerah Gunung Martimbang, satuan piroklastik Toba 1, satuan piroklastik Toba 2, dan juga Gunung Jorbing. Sayatan ini merupakan sayatan paling selatan dari daerah penelitian. Anomali maksimal pada sayatan ini bernilai sekitar 5 mgal. Kondisi ini dikarenakan oleh adanya massa batuan berdensitas tinggi (warna merah) dengan nilai $2,85 - 3,00 \text{ g/cm}^3$ pada koordinat X antara 492 sampai 497 dan mulai pada kedalaman $Z > 1 \text{ km}$. Anomali negatif rendah bernilai sekitar -7 mgal.

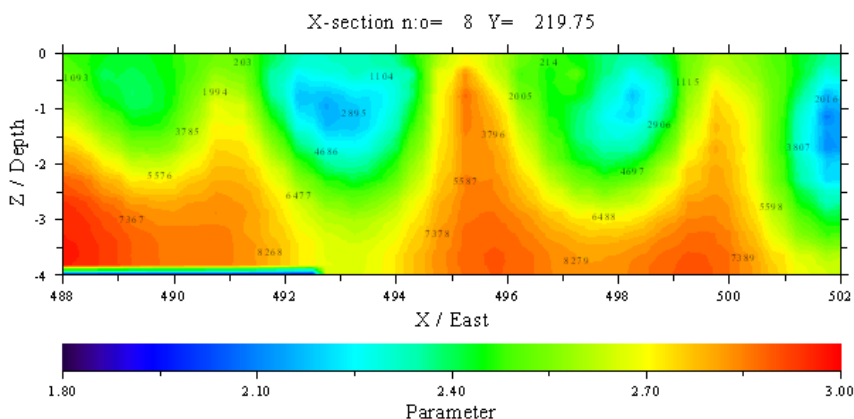


Gambar 4.8. Penampang model 2D lintasan A-A'

Kondisi ini dikarenakan oleh adanya massa batuan berdensitas sangat rendah (warna biru tua hingga biru muda) dengan nilai $1,8 - 2,1 \text{ g/cm}^3$ pada koordinat X antara 498 sampai 499 yang dimulai dari permukaan hingga kedalaman Z sekitar 2 km. Kemungkinan batuan ini diduga sebagai zona lemah dan merupakan produk dari proses deformasi. Jika kita bandingkan dengan kondisi geologi permukaannya, maka anomali rendah ini berada pada ujung graben Tarutung yang terbentuk akibat pertemuan 2 (dua) ujung sesar.

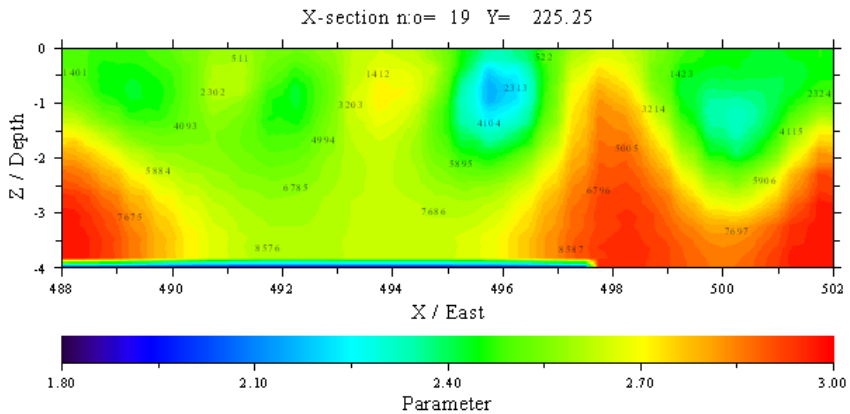
Penampang model 2D lintasan B-B' yang terdapat pada $Y = 219,75$ (Gambar 4.7) ditunjukkan oleh Gambar 4.9. Berdasarkan pada peta geologi daerah panas bumi Sipoholon (Gambar 2.2), sayatan penampang ini melintasi daerah mata air panas Parbubu, satuan endapan aluvium, sinter karbonat, satuan

piroklastik Toba 2, dan juga Gunung Jorbing. Anomali maksimal pada sayatan ini bernilai sekitar 8 mgal. Kondisi ini dikarenakan oleh adanya massa batuan berdensitas sedang (warna jingga) dengan nilai $2,75 - 2,90 \text{ g/cm}^3$ yang tersebar dibawah permukaan membentuk pola penerobosan keatas dengan rata-rata pada kedalaman 1 - 1,5 km. Anomali negatif rendah bernilai sekitar -4 mgal. Kondisi ini dikarenakan oleh adanya persebaran massa batuan berdensitas rendah (warna biru muda) dengan nilai $2,1 - 2,3 \text{ g/cm}^3$ di beberapa tempat. Salah satunya pada koordinat X antara 492 sampai 494 yang diduga sebagai patahan dan berperan sebagai pengontrol munculnya mata air panas Parbubu. Ada juga pada koordinat 498 sampai 499 dari permukaan hingga pada kedalaman 1,7 km yang diduga akibat respon dari sesar pembentuk graben Tarutung.



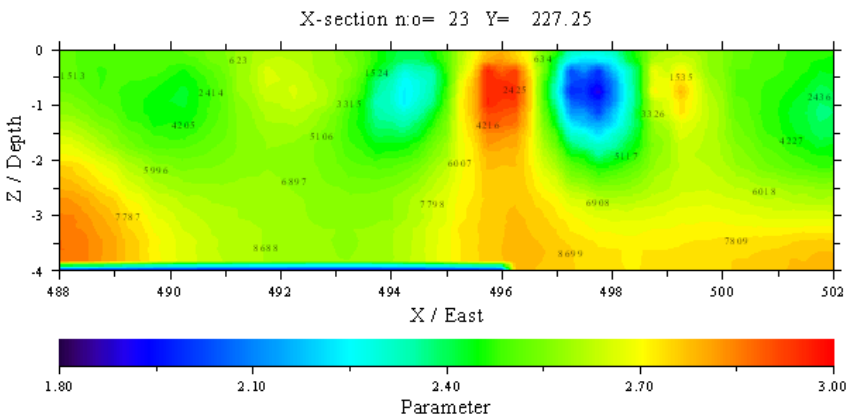
Gambar 4.9. Penampang model 2D lintasan B-B'

Penampang model 2D lintasan C-C' yang terdapat pada $Y = 225,25$ (Gambar 4.7) ditunjukkan oleh Gambar 4.10. Berdasarkan pada peta geologi daerah panas bumi Sipoholon (Gambar 2.2), sayatan penampang ini melintasi Gunung Siborboron, satuan piroklastik Toba 2, satuan endapan aluvium, sinter karbonat, dan juga daerah mata air panas Hutabarat. Anomali maksimal pada sayatan ini bernilai sekitar 7,5 mgal. Kondisi ini dikarenakan oleh adanya massa batuan berdensitas tinggi (warna merah) dengan nilai $2,80 - 3,00 \text{ g/cm}^3$ pada koordinat X antara 488 sampai 490 dan pada kedalaman rata-rata $Z > 2 \text{ km}$ pada koordinat X antara 497 sampai 502 dan pada kedalaman $Z > 1,7 \text{ km}$. Anomali negatif rendah bernilai sekitar -5 mgal. Kondisi ini dikarenakan oleh adanya massa batuan berdensitas rendah (warna biru muda) dengan nilai $2,12 - 2,3 \text{ g/cm}^3$ pada koordinat X antara 495 sampai 496,5 dari permukaan hingga kedalaman 1,5 km. Massa batuan ini diduga sebagai batuan yang mengalami patahan sehingga berperan sebagai pengontrol munculnya mata air panas Hutabarat.



Gambar 4.10. Penampang model 2D lintasan C-C'

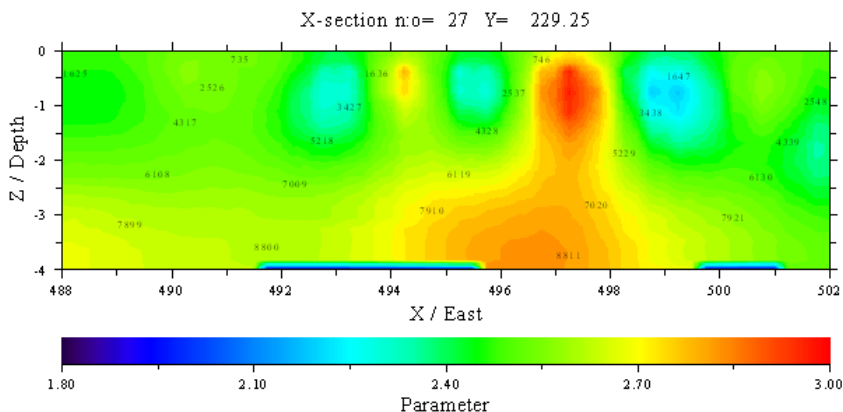
Penampang model 2D lintasan D-D' yang terdapat pada $Y = 227,25$ (Gambar 4.7) ditunjukkan oleh Gambar 4.11. Berdasarkan pada peta geologi daerah panas bumi Sipoholon (Gambar 2.2), sayatan penampang ini melintasi daerah satuan endapan aluvium, satuan piroklastik Toba 2 dan beberapa patahan berarah barat laut-tenggara. Anomali gravitasi maksimal pada sayatan ini bernilai sekitar 4 mgal. Kondisi ini dikarenakan oleh adanya massa batuan dengan berdensitas sedang (warna jingga) dengan nilai $2,75 - 2,85 \text{ g/cm}^3$ pada koordinat X antara 495,5 sampai 496,5 dan kedalaman Z antara 0,4 km sampai 1,2 km. Anomali negatif rendah bernilai sekitar -4 mgal. Kondisi ini dikarenakan oleh adanya massa batuan berdensitas rendah (warna biru tua hingga biru muda) di beberapa lokasi. Salah satunya massa batuan dengan nilai



Gambar 4.11. Penampang model 2D lintasan D-D'

densitas $2,2 - 2,3 \text{ g/cm}^3$ pada koordinat X antara 494 dari permukaan hingga pada kedalaman 1 km. Hal ini diduga respon dari sesar pembentuk graben Tarutung. Ada juga batuan dengan nilai densitas $1,95 - 2,2 \text{ g/cm}^3$ pada koordinat 497 sampai 498,5 dari permukaan hingga kedalaman 1,5 km. Hal ini diduga sebagai respon dari zona pertemuan beberapa sesar.

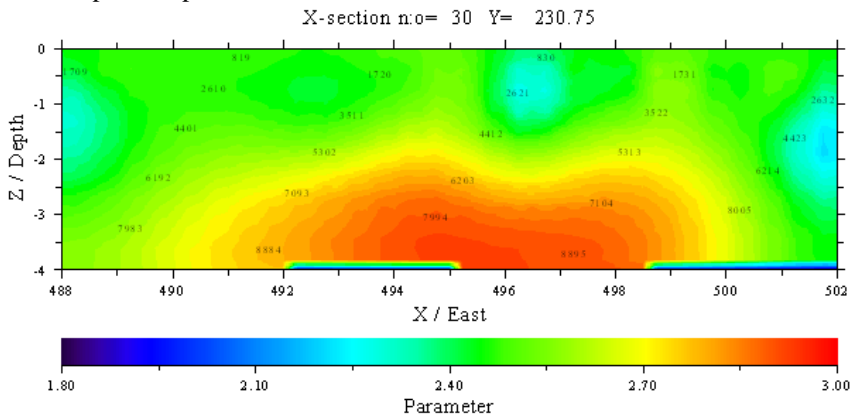
Penampang model 2D lintasan E-E' yang terdapat pada $Y = 229,25$ (Gambar 4.7) ditunjukkan oleh Gambar 4.12. Berdasarkan pada peta geologi daerah panas bumi Sipoholon (Gambar 2.2), sayatan penampang ini melintasi daerah Gunung Palangkagading, satuan Piroklastik Toba, sinter karbonat, dan mata air panas Sipoholon. Anomali gravitasi maksimal pada sayatan ini bernilai sekitar 7 mgal. Kondisi ini dikarenakan oleh adanya massa batuan berdensitas sedang (warna jingga) dengan nilai $2,75 - 2,95 \text{ g/cm}^3$ pada koordinat $X = 497$ dan kedalaman $Z = 0,5 \text{ km}$. Anomali negatif rendah bernilai sekitar -3 mgal. Kondisi ini dikarenakan oleh adanya massa batuan berdensitas rendah (warna biru muda) dengan nilai $2,15 - 2,3 \text{ g/cm}^3$ pada koordinat $X = 493$ dari permukaan hingga kedalaman $Z = 1,2 \text{ km}$. Hal ini diduga sebagai respon dari sesar yang mengontrol munculnya mata air panas Sipoholon.



Gambar 4.12. Penampang model 2D lintasan E-E'

Penampang model 2D lintasan F-F' yang terdapat pada $Y = 230,75$ (Gambar 4.7) ditunjukkan oleh Gambar 4.13. Berdasarkan pada peta geologi daerah panas bumi Sipoholon (Gambar 2.2), sayatan penampang ini melintasi daerah Gunung Palangka Gading dan satuan piroklastik Toba 2. Sayatan ini merupakan sayatan paling utara dari daerah penelitian. Anomali maksimal pada sayatan ini bernilai sekitar 5 mgal. Kondisi ini dikarenakan oleh adanya massa batuan berdensitas tinggi (warna jingga kemerahan) dengan nilai $2,80 - 3,00 \text{ g/cm}^3$ pada koordinat X antara 492 sampai 499 yang dimulai pada kedalaman

$Z > 2$ km. Diduga batuan ini merupakan batuan beku intrusi yang telah membeku namun masih memiliki sisa panas. Anomali negatif rendah tidak terlalu kontras. Kondisi ini dikarenakan oleh adanya persebaran massa batuan berdensitas rendah (warna biru muda) dengan nilai $2,15 - 2,25 \text{ g/cm}^3$ di beberapa tempat dari permukaan hingga kedalaman $Z = 1$ km. Hal ini diduga sebagai respon dari beberapa sesar diperkirakan yang tersebar di sekitar utara mata air panas Sipoholon.



Gambar 4.13. Penampang model 2D lintasan F-F'

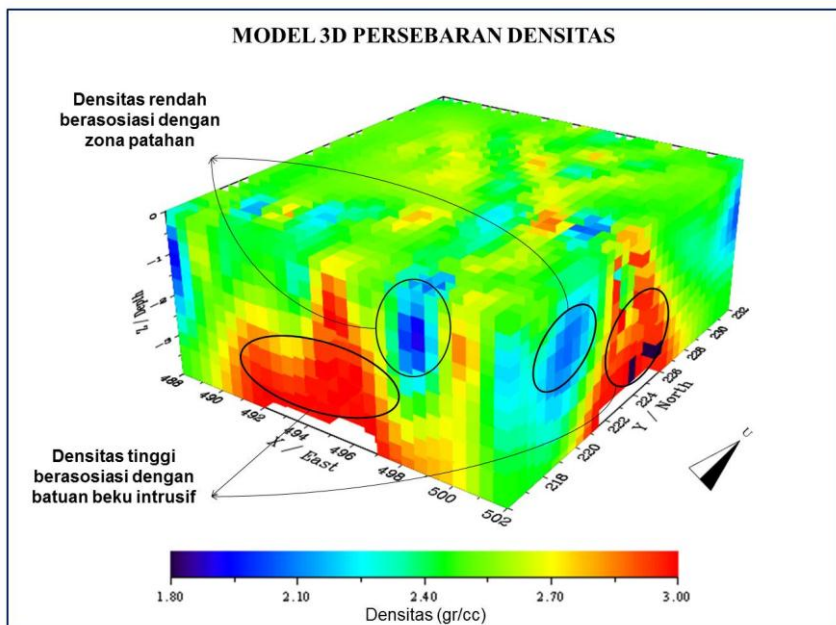
Gambar 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, dan 4.13 menunjukkan adanya komposisi densitas yang sama sehingga bisa dimungkinkan bahwa batuan penyusunnya juga sama. Berdasarkan nilai densitas batuan hasil pengambilan sampel di lapangan (Tabel 4.1) dan dikorelasikan dengan nilai densitas referensi (Gambar 2.10), maka diduga terdapat beberapa jenis batuan yang tersebar pada daerah penelitian.

Hasil interpretasi 2D ini menunjukkan distribusi densitas secara lateral. Batuan dengan densitas tinggi sekitar $2,80 - 3,00 \text{ g/cm}^3$ banyak ditemui pada kedalaman $>1,5$ km yang tersebar di beberapa tempat. Diduga bahwa batuan ini dahulu kala merupakan magma yang menerobos dan berhenti, hingga membentuk batuan beku. Namun, untuk melengkapi informasi bawah permukaan hasil interpretasi model penampang 2D ini, perlu juga harus didukung dengan interpretasi model terhadap secara 3 dimensi. Dengan demikian akan didapatkan korelasi distribusi densitas berdasarkan kedalaman tertentu pada daerah penelitian.

4.6 Analisis Model 3D

Hasil pemodelan gaya berat juga ditampilkan secara 3D menggunakan perangkat lunak *Bloxer 1.6* seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.14. Kemudian model ini dianalisis dengan pertimbangan dan dukungan data-data geologi

untuk menentukan posisi dari target penelitian. Gambar model tersebut menunjukkan batuan dengan densitas rendah tersebar tidak terlalu jauh (maksimal 1,5 km) di bawah permukaan, sedangkan batuan dengan densitas tinggi tersebar dan berkelompok-kelompok di beberapa tempat mulai pada kedalaman >1,5 km. Batuan dengan densitas tinggi dengan nilai 2,80 – 3,00 g/cm³ di bagian selatan terlihat muncul dari bawah hingga hingga kedalaman 2 km. Batuan ini diinterpretasikan sebagai batuan beku intrusif, yang diperkirakan berperan sebagai sumber panas pada sistem panas bumi di daerah penelitian ini.



Gambar 4.14. Analisis model 3D distribusi densitas

Sedangkan batuan dengan densitas rendah berkisar 2,0 – 2,3 g/cm³ juga ditemukan di beberapa tempat dekat permukaan sampai pada kedalaman 1,5 km. Densitas rendah yang berada di sebaran mata air panas diperkirakan berasosiasi dengan zona patahan yang mengontrol munculnya beberapa mata air panas pada daerah penelitian. Hal ini disebabkan karena batuan menjadi *permeable* sehingga memungkinkan untuk menjadi jalur migrasi fluida panas ke permukaan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian Tugas Akhir ini, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

1. Hasil pemodelan inversi 3D gaya berat memperlihatkan bahwa:
 - a) adanya blok batuan berdensitas tinggi yang diinterpretasikan sebagai batuan beku intrusif dan diduga berperan sebagai sumber panas dari sistem panas bumi daerah penelitian.
 - b) di dekat permukaan dan sekitar mata air panas daerah penelitian, terdapat blok batuan berdensitas rendah yang diinterpretasikan berasosiasi dengan rekahan membentuk zona patahan yang mengontrol manifestasi permukaan daerah penelitian.
 - c) Batuan beku intrusif yang diperkirakan menjadi sumber panas memiliki nilai densitas antara $2,80 - 3,00 \text{ g/cm}^3$ yang berada di bagian selatan dan timur dengan kedalaman $> 2 \text{ km}$, sedangkan batuan yang diinterpretasikan sebagai zona patahan memiliki nilai densitas antara $2,0 - 2,3 \text{ gr/cm}^3$.

5.2 Saran

Dari hasil pemodelan 3D gaya berat ini, penulis memberikan saran sebagai berikut.

1. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai informasi awal dalam pembuatan model konseptual daerah penelitian.
2. Menyarankan untuk melakukan survei magnetotellurik di daerah penelitian. Tujuannya adalah untuk mendapatkan informasi (letak, delineasi, dan kedalaman) komponen penyusun sistem panas bumi lainnya secara lebih rinci sehingga dapat mendukung data yang lain dalam pembuatan model konseptual sistem panas bumi daerah penelitian. Usulan daerah yang disarankan penulis untuk disurvei dapat dilihat pada Lampiran 3.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Akar, S. dan Young, K. 2015. *Assessment of New Approaches in Geothermal Exploration Decision Making*. Amerika Serikat: National Renewable Energy Laboratory (NREL), U. S. Department of Energy
- Atef, H., El-Gawada, A.M.S., Zaherb, M.A., dan Faraga, K.S.I. 2016. The Contribution Of Gravity Method In Geothermal Exploration Of Southern Part Of The Gulf of Suez–Sinai Region, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*. Vol. 5 (1). Hal: 173–185
- Berkthold, A. 1983. Electromagnetic Studies in Geothermal Regions. *Geophysical Surveys*. Vol 6. Hal: 173–200
- Blakely, R. J. 1996. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Inggris: Cambridge University Press
- Constable, S. C., Parker, R. L., dan Constable, C. G. 1987. Occam's Inversion: A Practical Algorithm for Generating Smooth Models from Electromagnetic Sounding Data. *Geophysics*, Vol. 52 (3), Hal: 289-300
- Cumming, W. 2009. Geothermal Resource Conceptual Models Using Surface Exploration Data. *Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. California: Stanford University, Stanford
- Djudjun, A. 2005. Penyelidikan Gaya Berat Daerah Panas Bumi Sipoholon-Tarutung Kabupaten Tapanuli Utara Propinsi Sumatera Utara. *Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Subdit panas Bumi*. Bandung: Pusat Sumber Daya Geologi Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia
- Elkins, T. A. 1951. The Second Derivative Method of Gravity Interpretation. *Geophysics*. Vol 23, Hal. 97 - 127
- Fedi, M dan Rapolla, A. 1999. 3D Inversion of Gravity and Magnetic Data With Depth Resolution. *Geophysics*. Vol. 64 (2). Hal: 452-460
- Fridleifsson, I. B., Bertani, R., Huenges, E., Lund, J. W., Ragnarsson, A., dan Rybach, L. 2008. The Possible Role And Contribution Of Geothermal Energy To The Mitigation Of Climate Change. *Proceedings Of The IPCC Scoping Meeting On The Renewable Energy Sources*. Jerman: University of Flensburg
- Grandis, H. 2009. *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Jakarta: Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI)
- Hasan, R., Setiadarma., Risdianto, D., dan Supardi, K. 2005. Geologi Daerah Panasbumi Sipoholon, Kabupaten Tapanuli Utara, Sumatera Utara. *Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Subdit Panas Bumi*. Bandung: Pusat Sumber Daya Geologi Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia
- Hinze, W.J., von Frese, R.R.B., dan Saad, A.H. 2013. *Gravity and Magnetic*

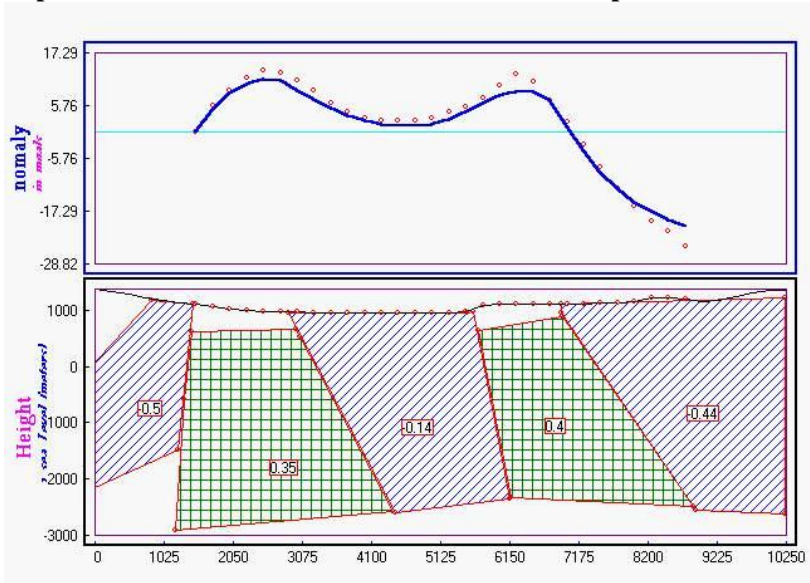
- Exploration – Principles, Practices, and Applications*. Inggris: Cambridge University Press
- Hjelt, S. E. 1992. *Pragmatic Inversion of Geophysical Data*. Jerman: Springer Verlag
- Hochstein, M. P., dan Sudarman, S. 1993. Geothermal Resources of Sumatra. *Geothermics*, Vol.22 (3). Hal: 181–200
- Hochstein, M. P. dan Browne, P. R. L. 2000. Surface Manifestation of Geothermal Systems with Volcanic Heat Sources. *Encyclopedia of Volcanoes*. Hal: 835-856. Academic Press
- Hochstein, M. P., dan Sudarman, S. 2008. History of Geothermal Exploration in Indonesia from 1970 to 2000. *Geothermics*. Vol. 37 (3). Hal: 220–266
- International Geothermal Association. 2014. *Best Practice Guide for Geothermal Exploration*. Jerman: Bochum University of Applied Sciences
- Jusmi, F. 2016. Pemodelan Tiga Dimensi Struktur Bawah Permukaan Daerah Panas Bumi Pamancalan Kabupaten Lebak, Provinsi Banten, Jawa Barat Berdasarkan Analisis Data Anomali Gravitasi. *Tesis*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada
- Menke, W. 1984. *Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory*. California: Academic Press, Inc.
- Moeck, I. 2013. Classification of Geothermal Plays According to Geological Habitats. *IGA Academy*. Report 0101
- Mortensen, A. and Axelsson, G. 2013. Developing a Conceptual Model of a Geothermal System. *Short Course on Conceptual Modelling of Geothermal Systems*. El-Slavador: UNU-GTP and LaGeo
- Muhsin, U., Haberland, C., Bauer, K., dan Weber, M. 2013. Three Dimensional Upper Crustal Structure of the Geothermal System in Tarutung (North Sumatra, Indonesia) Revealed by Seismic Attenuation Tomography. *Geophysics Journal International*. Vol. 195 Hal: 2037–2049
- Niasari, S. W. 2015. Magnetotelluric Investigation of the Sipoholon Geothermal Field, Indonesia. *Disertasi PhD*. Jerman: Freie Universität Berlin
- Nukman, M., dan Moeck, I. 2013. Structural Controls on a Geothermal System in the Tarutung Basin, North Central Sumatra. *Journal of Asian Earth Sciences*. Vol.74 Hal: 86–96
- Parttijavri, M. 2004. *GRABLOX: Gravity Interpretation and Modelling Software Based on 3D Block Model*. User's Guide. Archieve Report, Q 16.2/2004/2. Hal. 39. Geological Survey of Finland
- Peraturan Presiden No. 5 Tahun 2006. Kebijakan Energi Nasional. Jakarta: Sekretaris Kabinet Republik Indonesia

- Setianingsih, Efendi, R., Kadir, W.G.A., Santoso, D., Abdullah, A.I., Alawiyah, S. 2013. Gravity Gradient Technique to Identify Fracture Zones in Palu Koro Strike-Slip Fault. *Procedia Environmental Sciences*. Vol. 17 Hal: 248-255
- Situmorang, T. 2005. Penelitian Geomagnet Daerah Panas Bumi Ria-Ria Sipoholon, Tarutung, Tapanuli Utara. *Pemaparan Hasil Kegiatan Lapangan Subdit Panas Bumi 2005*. Bandung: Pusat Sumber Daya Geologi Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia
- Sugianto, A dan Rahadinata, T. 2015. Pemodelan Gaya Berat 3D Daerah Panas Bumi Dolok Morawa, Kabupaten Simalungun, Sumatera Utara. *Buletin Sumber Daya Geologi*. Vol. 10 (2). Hal: 26-39
- Sukhyar, R. dkk. 2012. *Potensi dan Pengembangan Sumber Daya Panas Bumi di Indonesia*. Bandung: Pusat Sumber Daya Geologi Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia
- Supriyanto. 2007. *Analisis Data Geofisika: Memahami Teori Inversi*. Depok: Departemen Fisika FMIPA Universitas Indonesia
- Telford, W. M., Geldart, L. P., dan Sheriff, R. E. 1990. *Applied Geophysics*. Edisi ke-2. Inggris: Cambridge University Press
- Tim Penelitian Terpadu PSDG. 2005. *Penelitian Terpadu Geologi, Geokimia, dan Geofisika Daerah Panas Bumi Sipoholon/ Siria-ria – Tarutung, Kabupaten Tapanuli Utara, Propinsi Sumatera Utara*. Bandung: Direktorat Inventarisasi Sumber Daya Mineral, Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia
- Williams, C. F., Reed, M. J., dan Anderson, A. F. 2011. Updating The Classification Of Geothermal Resources. *Proceedings of the Thirty Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. California: Stanford University
- Zarkasyi, A dan Suhanto, E. 2013. Pemodelan Inversi 3D Gaya Berat dan Magnet pada Sistem Panas Bumi Jaboi. *Buletin Sumber Daya Geologi*. Vol. 8 (1). Hal: 26-32
- Zarkasyi, A., dkk. 2015. Buku Panduan Penelitian Panas Bumi. Bandung: Pusat Sumber Daya Geologi Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

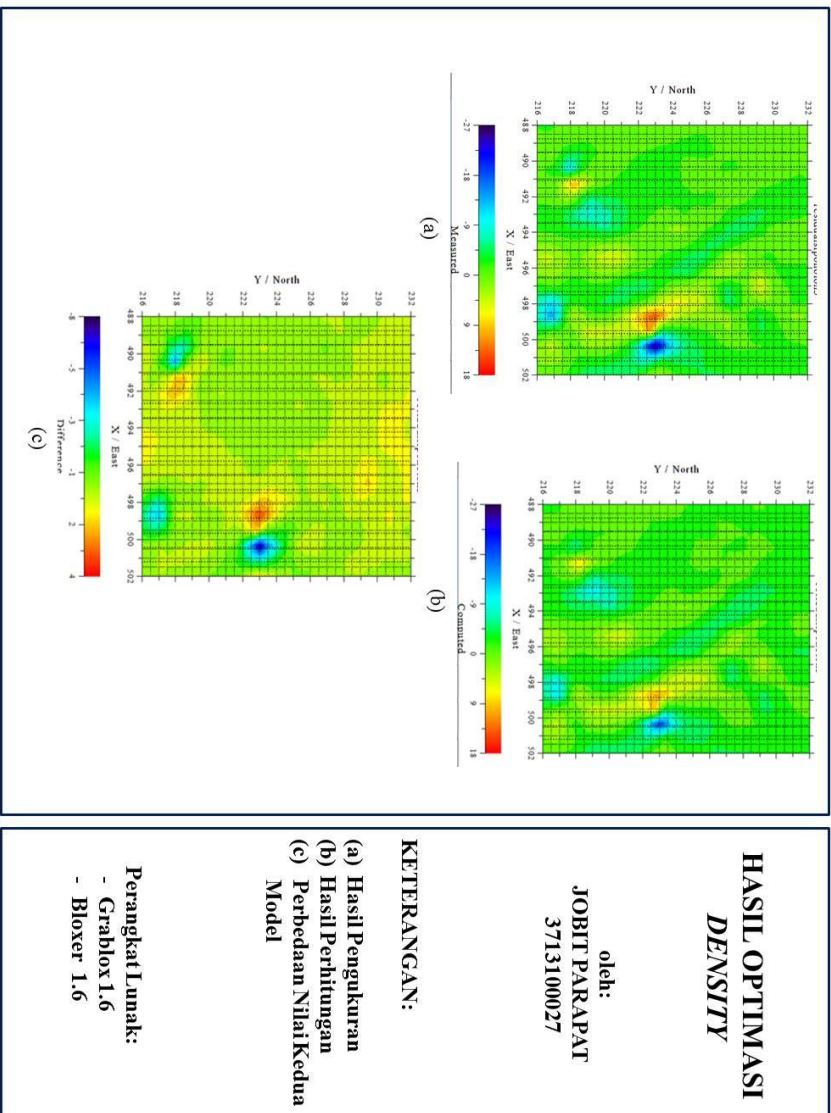
LAMPIRAN

Lampiran 1. Model Densitas 2D Hasil Pemodelan Kedepan



Gambar L.1. Model densitas penampang 2D daerah panasbumi Sipoholon sayatan C-D (Djudjun, 2005)

Lampiran 2. Hasil Optimasi



Gambar L.2. Hasil Optimasi Density

oleh:
JOBIT PARAPAT
3713100027

- (a) Hasil Pengukuran
- (b) Hasil Perhitungan
- (c) Perbedaan Nilai Kedua Model

Gambar L.3. Hasil Optimasi Occam d



HASIL OPTIMASI HEIGHTS

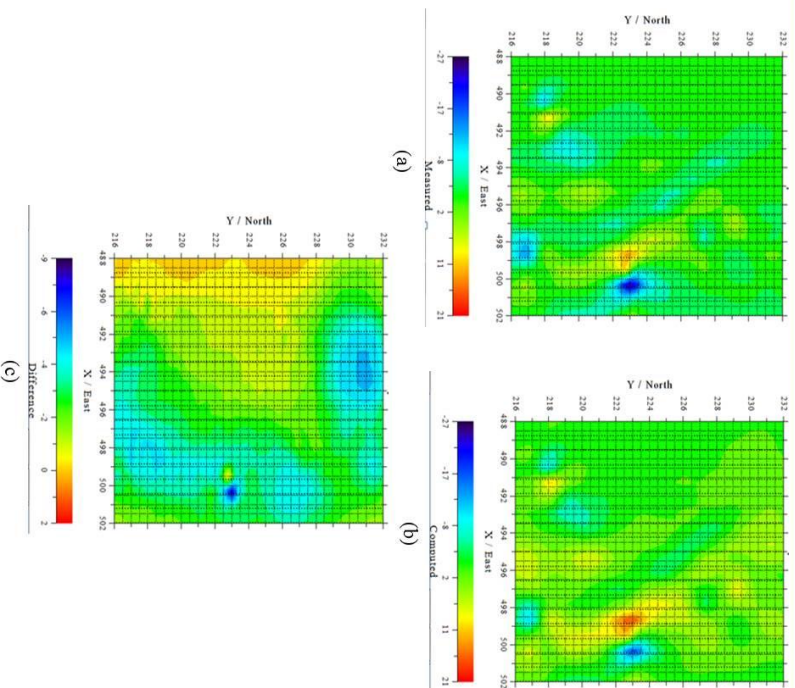
oleh:
JOBIT PARAPAT
3713100027

KETERANGAN:

- (a) Hasil Pengukuran
- (b) Hasil Perhitungan
- (c) Perbedaan Nilai Kedua Model

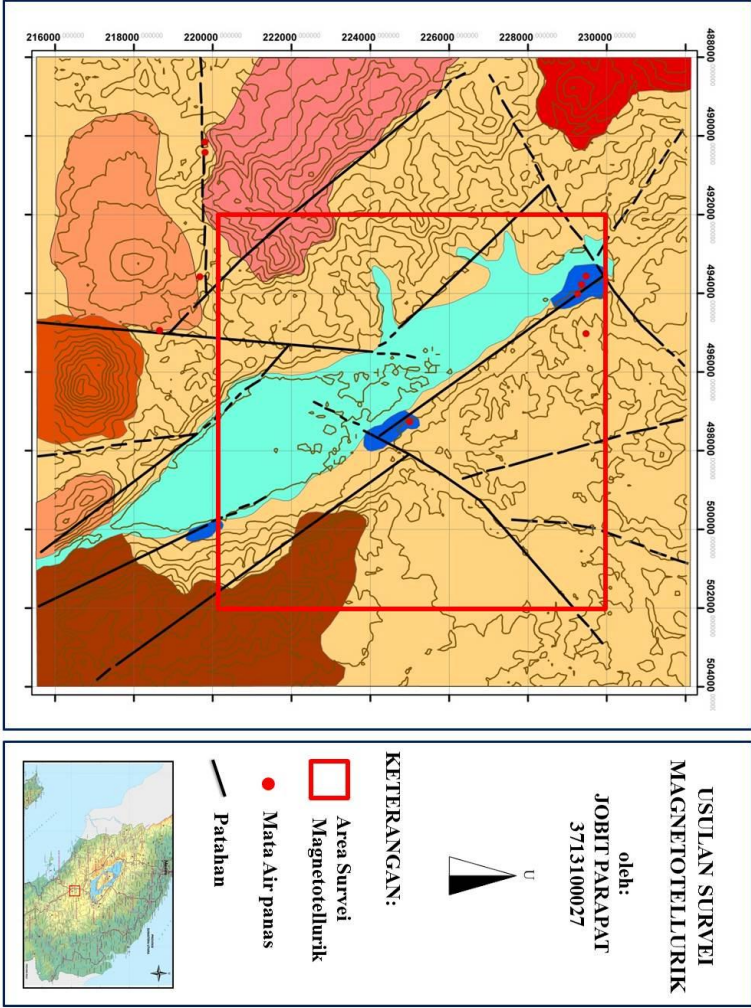
Perangkat Lunak:

- Grablox 1.6
- Bloxer 1.6



Gambar L.4. Hasil Optimasi *Heights*

Usulan Survei Magnetotellurik



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Penulis, yang bernama Jobit Parapat, lahir di Sitolubahal pada 14 Oktober 1994 dan merupakan anak ke-2 dari 4 (empat) bersaudara. Penulis menempuh pendidikan di SDN No. 173245 Siunggas Julu (2001-2007), SMPN 1 Purbatua (2007-2010), dan SMAN 2 Soporung Balige (2010-2013). Pada tahun 2013, penulis diterima berkuliah di Jurusan Teknik Geofisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Dalam kegiatan akademik, penulis yang gemar membaca tentang energi baru dan terbarukan ini, aktif dalam mengikuti kegiatan seminar, *workshop*, atau konferensi energi. Sebagai contoh, penulis pernah menjadi Delegasi Society of Petroleum Engineers Student Chapter Sepuluh Nopember Institute of Technology (SPE SC ITS) dalam Acara Konferensi Energi Internasional Intergrated Petroleum Week Institut Teknologi Bandung (IEC IPW ITB) pada tahun 2015. Penulis juga pernah menjadi Delegasi Society of Exploration Geophysicists Institut Teknologi Sepuluh Nopember Student Chapter (SEG ITS SC) Kategori Lomba Geobowl dalam 2nd South Asian Geosciences Student Conference (SAGSC) pada tahun 2016. Selain itu, penulis juga pernah menjabat sebagai Asisten Laboratorium Petrofisika yang berperan dan bertugas dalam beberapa kegiatan praktikum dan kegiatan kuliah lapangan.

Selain di bidang akademik, penulis juga cukup aktif berorganisasi. Beberapa diantaranya adalah pernah menjadi Staf Divisi Keprofesian Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika (2014-2015), Kepala Departemen Internal Society of Exploration Geophysicist ITS Student Chapter (2015-2016), Kepala Departemen Internal Mahasiswa Bonapasogit ITS (2015-2016), serta menjadi anggota dari Society of Petroleum Engineers ITS Student Chapter (2013-2016) dan Society of Exploration Geophysicist ITS Student Chapter (2013-2016). Penulis juga sering mengambil peran dalam kepanitiaan beberapa kegiatan baik tingkat jurusan, fakultas, maupun institut.

Di bidang keilmiahan, pada tahun 2016 penulis pernah melakukan penelitian dengan judul “*Pemetaan Kemenerusan Gua Karst Bawah Tanah dengan Metode Geolistrik Resistivitas 2-Dimensi Konfigurasi Dipole-Dipole sebagai Bentuk Inventarisasi Potensi Karst Desa Blaban, Kabupaten Pamekasan*”. Kegiatan ini terlaksanakan karena penulis dan tim mendapat kesempatan dibiayai oleh Kementerian Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia dalam kegiatan Program Kreativitas Mahasiswa. Selain itu, penulis juga berperan aktif dalam membantu berbagai kegiatan akuisisi data di lapangan dan beberapa penelitian dosen.

Apabila ada hal-hal yang ingin didiskusikan terkait dengan topik Tugas Akhir ini, Anda dapat menghubungi penulis melalui e-mail jobit.parapat@gmail.com atau nomor kontak +6285206458940.

Sekian dan terima kasih.

“Janganlah engkau lupa memperkatakan kitab Taurat ini, tetapi renungkanlah itu siang dan malam, supaya engkau bertindak hati-hati sesuai dengan segala yang tertulis di dalamnya, sebab dengan demikian perjalananmu akan berhasil dan engkau akan beruntung”
(Yosua 1 : 8)

“Segala perkara dapat kutanggung di dalam Dia yang memberi kekuatan kepadaku”
(Filipi 4 : 13)